

**ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ИМ. Б.И.СТЕПАНОВА НАН БЕЛАРУСИ»**

УДК 535.513: 537.862

**ХАХОМОВ
СЕРГЕЙ АНАТОЛЬЕВИЧ**

**ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В МЕТАМАТЕРИАЛАХ И
СПИРАЛЬНО-СТРУКТУРИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук
по специальности 01.04.05 – оптика

Минск, 2017

Работа выполнена в УО «Гомельский государственный университет имени Ф. Скорины».

Научный консультант: **Семченко Игорь Валентинович**,
доктор физико-математических наук, профессор,
проректор по учебной работе
УО «Гомельский государственный университет
имени Ф. Скорины».

Официальные оппоненты: **Зенькевич Эдуард Иосифович**,
доктор физико-математических наук, профессор,
профессор кафедры «Техническая физика»
Белорусского национального технического
университета
Максименко Сергей Афанасьевич,
доктор физико-математических наук, доцент,
директор НИУ «Институт ядерных проблем»
Белорусского государственного университета
Шепелевич Василий Васильевич,
доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий кафедрой теоретической физики
Мозырского государственного педагогического
университета им. И.П. Шамякина

Оппонирующая организация: **Белорусский государственный университет**

Защита состоится «21» ноября 2017 г. в 14.30 на заседании совета по защите диссертаций Д 01.05.01 при Государственном научном учреждении «Институт физики имени Б.И. Степанова Национальной академии наук Беларуси» по адресу: 220072, Республика Беларусь, г. Минск, пр-т Независимости, 68, к. 218; тел. ученого секретаря: 284-04-50, факс: 284-08-79, e-mail: ponyavina@ifanbel.bas-net.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института физики НАН Беларуси.

Автореферат разослан «18» октября 2017 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций
доктор физико-математических наук



А.Н. Понявина

ВВЕДЕНИЕ

Прогресс в развитии электродинамики неразрывно связан с развитием науки и потребностями практики. Современная электродинамика активно развивается в направлении исследования природных и разработки новых типов искусственных спирально-структурированных сред с оптимальными параметрами, так называемых метаматериалов, обладающих особыми свойствами, которые невозможно получить, используя природные вещества. В качестве характерных свойств метаматериалов принято рассматривать: отрицательные значения диэлектрической и магнитной проницаемости, отрицательный показатель преломления, сильные киральные свойства и др. Метаматериалы – это системы, состоящие из микрорезонаторов, обладающие электромагнитными свойствами, управлять которыми можно, варьируя параметры системы.

Исследования метаматериалов представляют как фундаментальный интерес, так и открывают широкие прикладные возможности по созданию приборов для управления ближним электромагнитным полем, включая новые типы электромагнитных сенсоров, компактные антенны, линзы с субволновым разрешением, объекты, скрытые в определенном диапазоне частот и др.

Объектом исследования диссертационной работы являются природные и искусственные системы с оптимальными параметрами, состоящие из киральных объектов в виде цилиндрических спиральных элементов.

В качестве элементов искусственных структур выбраны спиральные элементы, поскольку они характеризуются одновременно диэлектрическими и магнитными восприимчивостями. Сочетание диэлектрических и магнитных свойств и более того, их одинаково высокая значимость, является необходимым условием максимального проявления киральных свойств.

Каждый спиральный элемент характеризуется также магнитоэлектрической восприимчивостью, поскольку не обладает зеркальной симметрией и проявляет киральные свойства.

В работе проведена разработка теоретических основ преобразователей поляризации электромагнитных волн на основе композитных сред со спиральной структурой с целью трансформации линейно поляризованной волны в циркулярную. Показана возможность вращения плоскости поляризации отраженной электромагнитной волны при взаимодействии с двумерной решеткой на основе спиральных элементов. Полученные экспериментальные результаты подтверждают возможное использование двумерных решеток, состоящих из взаимно ортогональных парных спиральных элементов оптимальной формы, при конструировании слабо отражающих, но в то же время поглощающих структур.

Полученные результаты возможно использовать при создании частотно- и поляризационно-селективных фильтров, преобразователей поляризации, частотно-селективных защитных экранов и т.п. Рассматривается возможность использования таких структур для реализации волнового обтекания цилиндрических объектов.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами) и темами

Работа выполнена на кафедрах общей физики и оптики физического факультета УО «ГГУ имени Ф. Скорины». Выбор темы диссертационной работы был сделан с учетом необходимости разработки и исследования новых типов искусственных материалов, обладающих особыми свойствами, которыми не обладают природные материалы. Данное направление исследований соответствует п. 0602 («Новые оптические, волоконно-оптические и нелинейно-оптические компоненты, материалы и покрытия, новые материалы для приборов функциональной микро-, опто-, нано- и СВЧ-электроники») перечня приоритетных направлений фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2011–2015 годы (утвержден Постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 19.04.2010 № 585), п.6. «Электроника и фотоника»; п.8 «Многофункциональные материалы и технологии», п.12 «Междисциплинарные исследования» приоритетных направлений научных исследований Республики Беларусь на 2016–2020 годы» (утвержден постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 12 марта 2015 г. № 190).

Диссертационная работа подготовлена на основе результатов исследований, произведенных в рамках следующих научных заданий, проектов, программ и договоров: задание Министерства образования Республики Беларусь «Электромагнитные волны в искусственных анизотропных средах со сложной периодической структурой» (1997, № ГР 19971340); международный проект программы ИНТАС и РФФИ “Электродинамика новых искусственных бианизотропных композитных материалов” (Electromagnetics of new artificial bi-anisotropic composite materials, 1997-1998, 95-821 INTAS-RFBR); задание Министерства образования Республики Беларусь «Искусственные анизотропные среды при наклонном падении электромагнитных волн» (1998, №ГР 1998945); договор с БРФФИ № Ф97М-161 от 1.03.98 «Взаимодействие акустических волн и носителей заряда в материалах с вращающейся структурой анизотропии при наличии пространственной дисперсии среды» (1998-1999, №ГР 19981680); задание Министерства

образования Республики Беларусь «Акустоэлектронное взаимодействие в акустически гиротропных пьезополупроводниках во вращающемся электрическом поле» (1999, № ГР 19991240); международный проект программы ИНТАС «Электромагнитные волны в новых искусственных комплексных магнитных материалах» (Electromagnetic waves in the new artificial complex magnetic materials, 1999-2000, YSF 98-43 INTAS); задание Министерства образования Республики Беларусь «Распространение и преобразование электромагнитных волн в искусственных композитных средах со спиральной и омега-структурой» (2000 – 2001, № ГР 2000638); договор с БРФФИ № Ф99М-055 от 1.04.2000 «Микроволновые свойства новых искусственных комплексных композитов» (2000 – 2002, № ГР 20003572); задание Государственной программы ориентированных фундаментальных исследований «Электроника» «Электродинамика искусственных композитных спиральных и омега-структур в микроволновом диапазоне» (2001 – 2005, № ГР 20011320); задание государственной программы фундаментальных исследований «Когерентность» «Селективные оптические свойства многослойных магнитоактивных сред» (2001-2005 № ГР 20011315); задание Министерства образования Республики Беларусь «Преобразование поляризации электромагнитных волн СВЧ диапазона в искусственных композитных структурах со спиральными элементами» (2004 – 2005, № ГР 20041054); договор с БРФФИ № Ф06МС-015 от 1.04.2006 «Микроволновые свойства искусственных анизотропных сред» (2006 – 2008, № ГР 20064341); договор с БРФФИ № Ф08МС-050 от 1.04.2008 «Электродинамика метаматериалов с равными диэлектрическими и магнитными свойствами в микроволновом диапазоне» (2008 – 2010, № ГР 20082067); договор с БРФФИ № Ф10Р-230 от 1.05.2010 «Разработка и создание на основе оптимальных спиральных элементов метаматериалов, имеющих волновой импеданс, близкий к импедансу свободного пространства» (2010 – 2012, № ГР 20102646); договор с БРФФИ № Ф11МС-005 от 15.04.2011 «Разработка искусственных безотражательных структур со спиральными элементами оптимальной формы для реализации возможности огибания цилиндрических объектов СВЧ волнами» (2011 – 2013, № ГР 20112836); договор с ИФ НАН Беларуси № 12-27 от 01.04.2012 «Разработка на основе оптимальных спиральных элементов киральных метаматериалов для создания плоской «линзы» в терагерцовом диапазоне» (2012-2014, № ГР 20123094); договор с БРФФИ № Ф13МС-037 от 16.04.2013 «Исследование возможности создания «совершенного» двустороннего поглотителя СВЧ волн на основе оптимальных спиралей» (2013, № ГР 20131185); договор с ИФ НАН Беларуси № Ф15СО-047/1 от 20.07.2015 «Проектирование и теоретическое исследование гибких металл-полимерных высокопоглощающих неотражающих покрытий на основе трехмерных элементов для СВЧ и ТГц

диапазона» (2015 – 2017, № ГР 20151747); задание Государственной программы научных исследований «Фотоника, опто- и микроэлектроника» «Исследование двумерных и трехмерных метаматериалов в ТГц диапазоне частот с целью создания широкополосных поляризационных устройств» (2016-2018, № ГР 20161018); ХД 17-53 «Разработка состава золь-гель покрытия на основе диоксида кремния, технологии его нанесения на кремниевые пластины и измерение их электрофизических параметров для планаризации поверхности в технологии производства интегральных микросхем» (2017, № ГР 20171170).

Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы является теоретическое и экспериментальное исследование свойств метаматериалов и спирально-структурированных систем, выявление для них условий преобразования поляризации электромагнитных и акустических волн и подавления отраженной волны при поглощении прошедшей волны, а также обоснование возможностей практического применения физических свойств и явлений, характерных для указанного класса сред.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

- определить параметры спиральных элементов, при которых метаматериал в наибольшей мере проявляет киральные свойства;
- произвести аналитическое моделирование зависимости диэлектрической и магнитной проницаемости и киральной восприимчивости метаматериала от частоты излучения и характеристик спиральных элементов;
- в результате теоретического расчёта определить электрический дипольный и магнитный моменты, индуцируемые в спиральном элементе под действием падающей электромагнитной волны, с учетом возможного распределения плотности тока в спирали;
- определить параметры спиральных элементов, при которых возможно пассивное излучение ими циркулярно поляризованной волны;
- произвести теоретический расчет и на его основе – оптимизацию расположения микровключений в изотропной матрице в целях формирования слабо отражающих структур с сильным поглощением волн;
- произвести моделирование изменения поляризации и интенсивности электромагнитного излучения при его взаимодействии с отдельным спиральным элементом и метаматериалом, состоящим из множества таких спиральных элементов;
- разработать методику изготовления спиральных элементов и метаматериалов на их основе и создать образцы метаматериалов, состоящих из спиральных элементов, и в экспериментальных исследованиях произвести

проверку выводов и предположений, сделанных на основе теоретического описания.

Объектом исследования являются метаматериалы и спирально-структурированные системы, в частности такие, параметры которых оптимальны для поворота плоскости поляризации либо получения циркулярно поляризованной волны, для подавления отраженных ими электромагнитных волн в условиях сильного поглощения.

Предметом исследования являются волновые процессы в метаматериалах и спирально-структурированных системах, а также характеристики электромагнитного и акустического излучения, взаимодействующего с метаматериалами и спирально-структурированными системами с оптимальными параметрами: угол поворота плоскости поляризации, коэффициент эллиптичности прошедшей и отраженной волны, коэффициенты отражения и прохождения.

Научная новизна заключается в предсказании поведения новых метаматериалов и спирально-структурированных систем и исследовании их электромагнитных свойств, разработке теоретических основ новых типов частотных фильтров, преобразователей поляризации и дефлекторов электромагнитных волн на основе композиционных сред со спиральной структурой, изготовлении экспериментальных образцов данного класса материалов.

Разработан новый класс киральных метаматериалов на основе спиральных элементов оптимальной формы, когда метаматериал может проявлять одинаково значимые диэлектрические и магнитные свойства на резонансной частоте, а также показана возможность активации спиральных элементов как электрическим, так и магнитным полем падающей волны, то есть возможность достижения резонанса при различной поляризации волны.

Предложена новая концепция реализации метаматериала, сильно поглощающего, но не отражающего электромагнитную волну, в котором отсутствие отражения достигается согласованием входного импеданса метаматериала с волновым импедансом свободного пространства.

На основании классической теории дипольного излучения, спиральной модели молекул кирального вещества и энергетического подхода впервые показано, что молекула ДНК имеет оптимальную спиральную форму для глубокого ультрафиолетового диапазона.

Впервые указаны классы кристаллов, симметрия которых допускает формирование вращающейся анизотропии упругих свойств.

Впервые предсказан эффект подавления поглощения ультразвука, который может иметь место в условиях резонансного взаимодействия ультразвука с вращающимся электрическим полем.

Положения, выносимые на защиту

1. Для спиральных элементов метаматериалов существует универсальное соотношение между проекциями электрического дипольного момента и магнитного момента на ось спирали, позволяющее оптимизировать электромагнитные свойства метаматериала в целом, которое выполняется при произвольном распределении плотности тока в спиральном элементе, в том числе при сильно неоднородных токах, соответствующих резонансным условиям и обусловленных скин-эффектом. Установленное универсальное соотношение справедливо также для спиральных элементов, имеющих стратифицированную структуру, содержащую металлический, полупроводниковый и диэлектрический слои, наличие которых обусловлено технологией изготовления метаматериалов.

2. Существует оптимальный угол подъема спирали, при котором:

- индуцируемые в спиральном элементе в условиях резонансного воздействия электромагнитного поля электрический дипольный момент и магнитный момент дают равные вклады в энергию излучаемой волны;
- диэлектрическая, магнитная и киральная поляризуемости, характеризующие спиральный элемент как бианизотропную частицу, равны.

Оптимальный угол подъема одинаков для уединенного спирального элемента и для метаматериала с любой, включая предельно высокую, концентрацией спиральных элементов. Независимость оптимального угла подъема от электромагнитного взаимодействия спиральных элементов обуславливает возможность проектирования метаматериалов с различной концентрацией в них спиральных элементов.

3. В условиях полуволнового резонанса, которые функционально связаны с размерами спирального элемента, радиус и шаг спирального элемента однозначно определяются углом подъема спирали и числом витков, при этом оптимальный угол подъема не зависит от частоты электромагнитного излучения. Поэтому применение спирально-структурированных метаматериалов, содержащих оптимизированные спиральные элементы, возможно в широком диапазоне частот, включающем видимую, дальнюю ИК и СВЧ области спектра.

4. Теоретически обоснована и экспериментально реализована возможность практического использования оптимизированных спирально-структурированных метаматериалов:

- в преобразователях поляризации, которые отражают циркулярно поляризованную волну в направлении, перпендикулярном оси спирали отдельного спирального элемента, при активации как электрическим, так и магнитным полем, вне зависимости от азимута поляризации падающей волны, что обусловлено тем, что в каждом элементе индуцируются согласованные

между собой электрический дипольный момент и магнитный момент, равные по абсолютной величине и колеблющиеся со сдвигом фазы в 90 градусов;

- для создания сильно поглощающих, но слабо отражающих метаматериалов, согласованных по волновому импедансу со свободным пространством, когда равны значения их диэлектрической и магнитной проницаемостей, являющихся комплексными величинами;

- для конструирования и практической реализации структур, обеспечивающих обтекание объектов электромагнитными волнами, в отношении которых эффективные значения диэлектрической и магнитной проницаемости метаматериала равны друг другу; необходимый для этого градиент показателя преломления неоднородной среды достигается в результате специфического распределения спиральных элементов в пространстве, которое обеспечивает восстановление волнового фронта волны за объектом;

- для создания искусственных сред с отрицательным показателем преломления, который при равенстве диэлектрической и магнитной проницаемостей метаматериала прямо пропорционален его диэлектрической проницаемости. Отрицательные значения показателя преломления могут быть реализованы для таких сред при меньшей концентрации спиральных элементов, чем в диэлектрических метаматериалах с прямолинейными вибраторами и магнитных структурах на основе кольцевых резонаторов.

5. На основе классической теории дипольного излучения, спиральной модели молекул кирального вещества и энергетического подхода обоснована возможность определения оптимальных структурных характеристик природных объектов, содержащих спиральные элементы, в частности обнаружено, что молекула ДНК имеет оптимальную форму спирали для глубокого ультрафиолетового диапазона.

Личный вклад соискателя

Представленные в диссертации положения и основные результаты получены лично соискателем при научном консультировании доктора физико-математических наук, профессора И. В. Семченко.

Соискатель непосредственно участвовал в постановке задач исследования и планировании их решения, произведении теоретических расчетов, численном моделировании, в разработке методики изготовления экспериментальных образцов и изготовлении опытных образцов, проведении экспериментальных исследований, в проведении анализа полученных экспериментальных данных и подготовке публикаций. Из совместно опубликованных работ в диссертацию включены результаты, полученные автором лично или на паритетных началах с соавторами. При выполнении исследований, результаты которых опубликованы совместно с И.В. Семченко, А.Л. Самофаловым и

А.П. Балмаковым, соавторами даны полезные рекомендации при обсуждении и интерпретации результатов, полученных соискателем.

Измерения в терагерцовом диапазоне с использованием лазера на свободных электронах выполнены в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН и Институте физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН С.В. Голодом, А.Г. Милехиным, В.В. Кубаревым под руководством В.Я. Принца, Е.В. Наумовой – в рамках совместных белорусско-российских проектов.

Спектроскопические измерения в терагерцовом диапазоне с использованием фемтосекундных лазеров произведены в Институте физики НАН Беларуси под руководством А.М. Гончаренко, Г.В. Сеницына.

Измерения, целью которых была экспериментальная проверка теоретических предсказаний о возможности использования спиральных элементов для трансформации падающего линейно поляризованного излучения в циркулярно поляризованную волну, в СВЧ диапазоне выполнялись в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики» (Университет ИТМО, Российская Федерация) А.П. Слободжанюком, С.Д. Барсуковым, А.С. Побяхой под руководством П.А. Белова.

Среды для матриц комплексных материалов изготавливались в Институте механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси под руководством В.А. Банного.

Исследование свойств сред, содержащих спиральные включения, производилось диссертантом в Ягеллонском университете (г. Краков, Польша) под руководством С. Вробеля (S.Wrobel).

Образцы керамики изготовлены в Институте физики твердого тела и полупроводников НАН Беларуси под руководством А.И. Акимова. Образцы ДНК приготовлены в Институте леса НАН Беларуси под руководством В.А. Ипатьева. Образцы с Ω -структурой изготовлены в Международной китайско-белорусской научной лаборатории по вакуумно-плазменным технологиям (ГГУ им. Ф. Скорины и Нанкинский университет науки и технологии) Н.Н. Федосенко, Д.Г. Пилипцовым, М.А. Подаловым под руководством А.В. Рогачева.

Компьютерное моделирование производилось с помощью лицензионного пакета программ ANSYS HFSS, предоставленного Университетом Аалто, Финляндия в рамках совместных белорусско-финских проектов, В.С. Асадчим и И.А. Фаняевым под руководством С. Третьякова (S.Tretyakov).

Апробация результатов диссертации и информация об использовании ее результатов

Результаты, полученные в ходе диссертационных исследований, доложены и обсуждены на следующих конференциях: International Conference and Workshop on Electromagnetics of Complex Media, Bianisotropics' 97, The University of Glasgow, Great Britain, 5 – 7 June 1997; 7th International Conference on Complex Media, Bianisotropics' 98, Technical University of Braunschweig, Germany, 3 – 6 June 1998; International Conference Applied Optics' 98, St. Petersburg, Russia, 16 – 18 December 1998; международном семинаре «Конверсия научных исследований в Беларуси в рамках деятельности МНТЦ», Минск, Беларусь, 17 – 22 мая 1999; XXVIth General Assembly of Radio Science, Toronto, Canada, 13 – 21 August 1999; XXIV National Convention on Radio Sciences, Turku, Finland, 4 – 5 October 1999; 8th International Conference on Complex Media, Bianisotropics' 2000, Technical University of Lisbon, Portugal, 27 – 29 September 2000; International Scientific Conference “Optics of Crystals”, SPIE, Mozyr, Belarus, 26 – 30 September 2000; 2001 URSI International Symposium on Electromagnetic Theory, Victoria, BC, Canada, 13 – 17 May 2001; 2001 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference, Belem, Brazil, 6 – 10 August 2001; International Conference “Problems of Interaction of Radiation with Matter”, Gomel, Belarus, 30 October – 1 November 2001; 9th International Conference on Complex Media, Bianisotropics' 2002, Marrakech, Morocco, 8 – 11 May 2002; 4-ой международной научно-технической конференции «Квантовая электроника», Минск, Беларусь, 18 – 21 ноября 2002; 10th International Conference on Complex Media and Metamaterials, Bianisotropics' 2004, Ghent, Belgium, 22 – 24 September 2004; международной научной конференции «Актуальные проблемы физики твердого тела», ФТТ-2005, Минск, Беларусь, 26 – 28 октября 2005; юбилейной научно-практической конференции, посвященной 75-летию со дня основания Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины, Гомель, Беларусь, 14 – 15 июня 2005; International Conference on Complex Media and Metamaterials, Bianisotropics' 2006, Samarkand, Uzbekistan, 25 – 28 September 2006; II международной научной конференции «Проблемы взаимодействия излучения с веществом», Гомель, Беларусь, 1 – 3 ноября 2006; 5th International Conference on Global Research and Education, Inter-Academia 2006, Iasi, Romania, 25 – 28 September 2006; International Conference on Global Research and Education, Inter-Academia 2007, Hamamatsu, Japan, 26 – 30 September 2007; 1st International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics, Metamaterials 2007, Rome, Italy, 22 – 24 October 2007; Advanced Research Workshop META'08, Metamaterials for Secure Information and Communication Technologies, Marrakesh, Morocco, 7 – 10 May 2008;

2nd International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics, Metamaterials 2008, Pamplona, Spain, 21 – 26 September 2008; 7th International Conference on Global Research and Education Inter-Academia 2008, Pecs, Hungary, 15 – 18 September 2008; II конгрессе физиков Беларуси, Минск, Беларусь, 3 – 5 ноября 2008; 3rd International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics, Metamaterials 2009, London, Great Britain, 30 August – 4 September 2009; Fourth International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics, Metamaterials 2010, Karlsruhe, Germany, 13 – 18 September 2010; International Conference «Optical Techniques and Nano-Tools for Material and Life Sciences», OTN4MLS-2010, Minsk, Belarus, 15-19 June 2010; Гомельском научном семинаре по теоретической физике (посвященном 100-летию со дня рождения Ф.И. Федорова), ГГУ имени Ф. Скорины, Гомель, Беларусь, 20 – 22 июня 2011; III конгрессе физиков Беларуси, Минск, Беларусь, 25 – 27 сентября 2011; 10th International Conference on Global Research and Education Inter-Academia 2011, Sucevita, Romania, 26 – 29 September 2011; 5th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics, Metamaterials 2011, Barcelona, Spain, 10 – 15 October 2011; III международной научной конференции «Проблемы взаимодействия излучения с веществом», Гомель, Беларусь, 9 – 11 ноября 2011; 21st Academic Symposium of Materials Research Society of Japan, Yokohama, Japan, 19 – 21 December 2011; 59th Spring Meeting, (The Japan Society of Applied Physics), Waseda University, Tokyo, Japan, 15 – 18 March 2012; 11th International Conference on Global Research and Education, in Engineers for Better Life, Inter-Academia 2012, Budapest, Hungary, 27 – 30 August 2012; 6th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics, Metamaterials 2012, St. Petersburg, Russia, 17 – 22 September 2012; Days on Diffraction 2013, International Conference, Saint Petersburg, 27 – 31 May 2013; 7th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics, Metamaterials 2013, Bordeaux, France, 16 – 21 September 2013; 8th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics, Metamaterials 2014, Copenhagen, Denmark, 25 – 30 August 2014; 13th International Conference on Global Research and Education, Inter-Academia 2014, Riga, Latvia, 10 – 12 September 2014; International Scientific Conference “Optics of Crystals”, Mozyr, Belarus, 23 – 26 September 2014; 9th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics, Metamaterials 2015, Oxford, Great Britain, 7 – 12 September 2015; 14th International Conference on Global Research and Education, Inter-Academia 2015, Hamamatsu, Japan, 28 – 30 September 2015; 10th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics, Metamaterials 2016, Chania, Crete, Greece, 17 – 22 September 2016; 15th International Conference on Global

Research and Education, Inter-Academia 2016, Warsaw, Poland, 26 – 28 September 2016; IV международной научной конференции «Проблемы взаимодействия излучения с веществом», Гомель, Беларусь, 9 – 11 ноября 2016; Korea-Belarus S&T Forum, 14 December 2016, Seoul, Korea; Progress in Electromagnetics Research Symposium, PIERS 2017, May 22–25, 2017, St. Petersburg, Russia.

Результаты работы доложены также на научных семинарах Университета Аалто (Хельсинки, Финляндия, 1999), Ягеллонского университета (Краков, Польша, 2002), университета Сидзуока (Хамамачу, Япония, 2007), Нанкинского университета науки и технологии (Нанкин, Китай, 2012), факультета физики и информационных технологий и кафедр общей физики и оптики УО «ГГУ имени Ф. Скорины» (1997 – 2017 гг.).

Результаты, представленные в диссертационной работе, используются в учебном процессе факультета физики и информационных технологий УО «ГГУ имени Ф. Скорины» при выполнении курсовых и дипломных работ при подготовке студентов специальностей «Физическая электроника», «Физика» (специализации «Лазерная физика и спектроскопия», «Новые материалы и технологии») (имеется 5 актов внедрения результатов в учебный процесс), в ОАО «Интеграл», ЗАО «Группа Кремний Эл» (имеется 2 акта о практическом использовании результатов исследования в промышленности).

Разработанная соискателем методика изготовления экспериментальных образцов используется в УО «ГГУ имени Ф. Скорины» для выполнения ряда научных проектов.

Опубликование результатов диссертации

Результаты диссертации опубликованы в 128 научных работах, в числе которых: 1 монография, 5 глав в книгах, 54 статьи в рецензируемых научных журналах, из которых 41 соответствуют п.18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, а также 59 статей в сборниках материалов научных конференций и 4 препринта. По результатам диссертационных исследований получено 5 патентов на изобретения. Общий объем работ составил 39,4 авторских листов.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, шести глав, заключения, библиографического списка, приложений. Полный объем диссертации составляет 326 страниц. Текст диссертации иллюстрирован 6 таблицами, расположенными на 2 страницах, и 171 рисунками, занимающими 80 страниц. На 40 страницах списка использованных источников приведены библиографические описания 415 научных работ, в том числе на 18 страницах 128 работ, опубликованных соискателем.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

В первой главе содержится аналитический обзор литературы по теме диссертационного исследования. Дана краткая характеристика искусственных и природных спирально-структурированных систем и приведены их частные примеры: метаматериалы, фотонные кристаллы, ХЖК, ДНК. Оценена возможность различного функционального использования спиральных элементов: для создания среды с одновременно отрицательными значениями диэлектрической и магнитной проницаемости; для электромагнитной маскировки тел методом волнового обтекания.

Рассмотрены существующие методы изготовления метаматериалов и нанотехнологии ДНК, акцентированы их достоинства и недостатки.

Сформулирована гипотеза о возможности использования спирально-структурированных сред для создания слабо отражающих экранов на основе одно- и многослойных киральных структур, а также в целях формирования поглощающих покрытий на основе однородных киральных структур. Указано, что искусственные спирально-структурированные среды могут быть использованы при создании частотных и поляризационно-селективных фильтров и преобразователей поляризации.

Выявлены проблемы, актуальные для решения задач, связанных с конструированием, изготовлением, исследованием и практическим применением метаматериалов, и на этой основе обоснованы выбор объекта исследования и сформулирована цель диссертационной работы, указанная в разделе «Общая характеристика диссертации». Акцентированы отличительные особенности исследований, произведенных в настоящей диссертационной работе, от известных более ранних исследований.

Во второй главе содержится общая характеристика работ на разных этапах исследования и использованных при этом средств, в частности: перечислены и кратко охарактеризованы основные этапы произведённого в диссертации исследования распространения электромагнитных волн в метаматериалах и спирально-структурированных системах с оптимальными параметрами; обоснована целесообразность применения и описана суть методов, использованных при изготовлении экспериментальных образцов метаматериалов на основе спиральных элементов, предназначенных для работы в СВЧ и терагерцовом диапазонах; приведено описание оборудования, использованного в экспериментальных исследованиях; кратко изложена общая методика теоретического исследования свойств электромагнитных и акустических волн в гиротропных средах с периодической структурой.

В завершение главы кратко описана методика статистической обработки результатов исследований.

В третьей главе разработаны теоретические основы преобразования поляризации электромагнитных волн на основе композитных сред со спиральной структурой, и описаны конструкции соответствующих функциональных устройств, в том числе предназначенных для трансформации линейно поляризованной волны в циркулярно поляризованную.

Рассмотрена спираль, состоящая из витков радиуса r и имеющая длину L . Высота спирали $H=hN_c$, угол подъема спирали относительно плоскости, перпендикулярной оси спирали, равен α , ось спирали совмещена с осью ox , N_c – число витков спирали (рисунок 1). Величина удельного кручения спирали q связана с шагом спирали h соотношением:

$$h = 2\pi/|q|. \quad (1)$$

Знак величины q определяет направление кручения спирали в пространстве. При $q > 0$ спираль образует правый винт (см. рисунок 1).

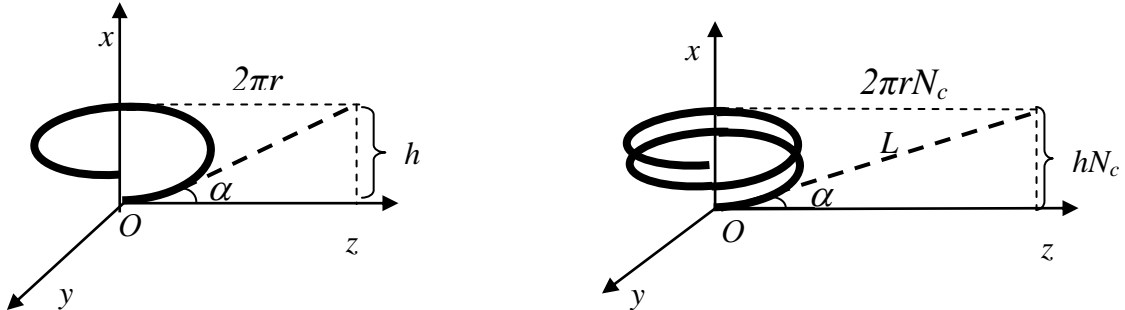


Рисунок 1. – Схематическое изображение спирали и её развёрнутый вид

Рассмотрен главный резонанс, когда длина спирали приблизительно равна половине длины волны падающего излучения. В этом случае сила тока монотонно убывает при удалении от центра спирали, обращаясь в нуль на ее краях. Показано, что y -компоненты электрического дипольного и магнитного моментов спирали обращаются в нуль независимо от числа витков спирали. Это свойство обусловлено симметричностью распределения тока относительно центра спирали. По мере возрастания числа витков абсолютные значения z -компонент электрического дипольного и магнитного моментов спирали уменьшаются по сравнению со значениями x -компонент. Таким образом, главную роль играют составляющие моментов вдоль оси спирали.

Получено соотношение между проекциями электрического дипольного p_x и магнитного m_x моментов на ось спирали

$$p_x = \frac{2i}{\omega r^2 q} m_x, \quad (2)$$

которое является универсальным, поскольку не зависит от распределения тока в спирали. Именно x -компоненты моментов спирали играют главную роль при излучении циркулярно поляризованной волны в направлении, перпендикулярном оси спирали (ω – циклическая частота изменения тока в спирали, i – мнимая единица).

Универсальность соотношения (2) следует понимать и в более широком смысле. В метаматериале ток в каждой спирали может изменяться не только в результате прямого воздействия падающей электромагнитной волны, но и под влиянием других спиралей, образующих структуру. Однако при любых изменениях тока компоненты электрического дипольного момента p_x и магнитного момента m_x изменяются согласованно, и соотношение (2) остается справедливым. Поэтому геометрические параметры спирали, приведенные ниже, обеспечивают получение циркулярно поляризованной волны даже при значительном возрастании концентрации спиральных элементов в метаматериале.

Каждая спираль обладает одновременно диэлектрическими, магнитными и киральными свойствами. Следовательно, ее поведение в электромагнитном поле можно описать с помощью уравнений

$$\vec{p} = \varepsilon_0 \alpha_{ee} \vec{E} + i \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} \alpha_{em} \vec{H}, \quad \vec{m} = \alpha_{mm} \vec{H} - i \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} \alpha_{me} \vec{E}, \quad (3)$$

где α_{ee} и α_{mm} – тензоры диэлектрической и магнитной восприимчивости; α_{em} и α_{me} – псевдотензоры, характеризующие киральные свойства спирали; ε_0 и μ_0 – электрическая и магнитная постоянные соответственно. Из принципа симметрии кинетических коэффициентов следует, что выполняется следующее соотношение

$$\alpha_{em} = \alpha_{me}^T, \quad (4)$$

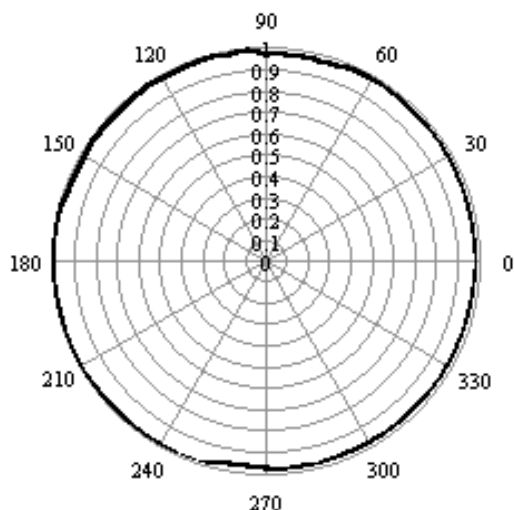
где символ T означает транспонирование тензора, мнимая единица i записана в материальных уравнениях (3) в явном виде.

Одновременное использование соотношений (2) и (3) приводит к результату

$$\alpha_{ee}^{(11)} = \alpha_{mm}^{(11)}, \quad \alpha_{ee}^{(11)} = \pm \alpha_{em}^{(11)}, \quad (5)$$

где $\alpha^{(ik)}$ – компоненты рассматриваемых тензоров и псевдотензоров, знак «+» соответствует спирали с правосторонней намоткой, знак «-» – левосторонней спирали. Соотношения (5) показывают, что спирали с найденными оптимальными параметрами проявляют в равной мере диэлектрические, магнитные и киральные свойства. Равенство всех трех восприимчивостей для оптимальных спиралей подтверждается экспериментальными данными, в частности, излучением оптимальной спиралью циркулярно поляризованной волны в направлении, перпендикулярном оси спирали. Результаты исследования приведены на рисунках 2, 3.

Как видно из графика на рисунке 3, максимальное значение коэффициента эллиптичности находится в диапазоне частот 2,8–2,9 ГГц. Теоретический расчет предполагает циркулярную поляризацию отраженной волны для данного образца на частоте падающего излучения, равной 3 ГГц.



Параметры спирали: $L = 5$ см; $r = 3,95 \cdot 10^{-3}$ м; $N_c = 2$; $\alpha = 7,1^\circ$; $h = 3,1 \cdot 10^{-3}$ м; резонансная частота падающей линейно поляризованной волны 2,85 ГГц

Рисунок 2. – Поляризационная диаграмма электромагнитной волны, отражённой метаповерхностью, образованной двухвитковыми спиральными элементами

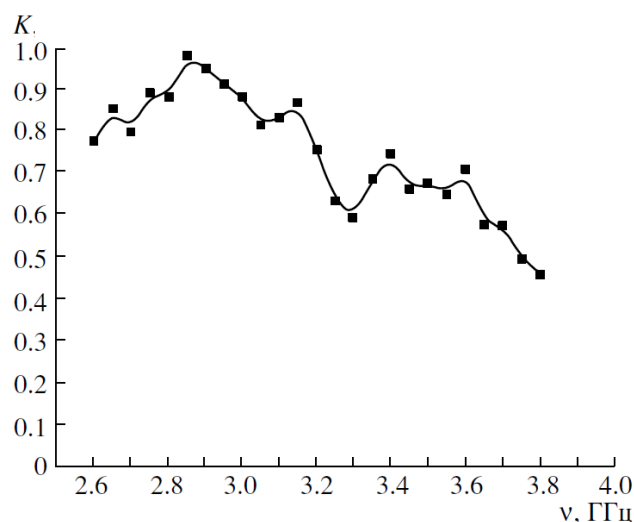


Рисунок 3. – Частотная зависимость коэффициента эллиптичности электромагнитной волны, отражённой от метаповерхности, состоящей из упорядоченных двухвитковых спиральных элементов

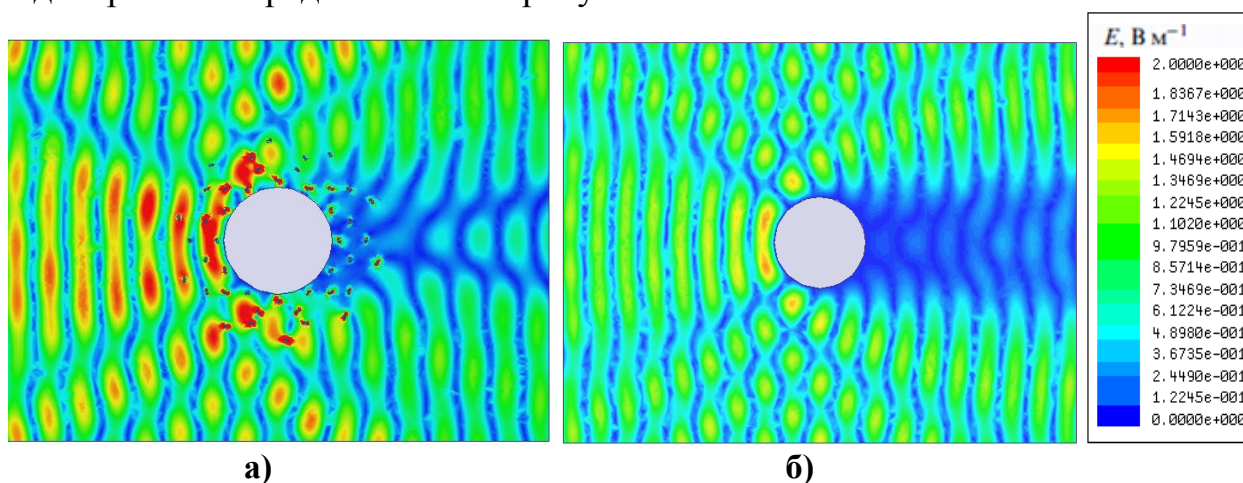
Такой сдвиг наблюдаемой резонансной частоты по сравнению с расчетной может быть объяснен замедлением электромагнитных волн в спиральных элементах метаповерхности. Это уменьшение скорости волн может происходить в результате индуцирования значительных электрических дипольных и магнитных моментов в спиралях.

Падающую линейно поляризованную волну можно рассматривать как суперпозицию двух циркулярно поляризованных волн: «правой» и «левой». Правая спираль с найденными оптимальными параметрами на резонансной частоте излучает только левую циркулярную волну и не взаимодействует с волной противоположной поляризации. Следовательно, правую спираль с такими параметрами при соответствующей ориентации спирали можно рассматривать как «ортогональный осциллятор» по отношению к правой круговой волне на резонансной частоте. Другими словами, оптимальная спираль является прозрачной по отношению к правой и левой циркулярно поляризованной волне, в зависимости от направления закручивания спирали.

Таким образом, разработаны теоретические основы преобразователей поляризации электромагнитных волн на основе композитных сред со спиральной структурой, в том числе с целью трансформации линейно поляризованной волны в циркулярную. Сделанные при этом выводы подтверждены экспериментально [127, 128].

Показано, что исследуемые спирали проявляют оптимальные свойства при активации как электрическим, так и магнитным полем, то есть при любой ориентации плоскости поляризации падающей волны. В этом состоит преимущество оптимальных спиралей перед другими возможными элементами метаматериалов, например, прямолинейными вибраторами и кольцевыми резонаторами. Показано также, что с использованием двумерных метаматериалов на основе спиральных элементов можно реализовать поворот плоскости поляризации электромагнитной волны без изменения ее эллиптичности. Для этого необходимо использовать спирали с соответствующим углом подъема.

Теоретически и экспериментально обоснована возможность использования гладких спиралей с оптимальной формой для реализации безотражательного огибания электромагнитной волной цилиндрических объектов. Для уменьшения потерь энергии в метаматериале следует уменьшить общее количество металлических элементов, не допуская при этом их высокой концентрации во внутренних областях искусственной структуры, близких к объекту. Проведен анализ распределения спиральных элементов в пространстве, которое обеспечивает необходимый градиент показателя преломления искусственного покрытия. Моделирование бесконечной многослойной искусственной структуры, описание которой приведено в разделе 3.7.1, произведено методом конечных элементов. Результаты моделирования представлены на рисунке 4.



а – металлический цилиндр, окружённый искусственной структурой;

б – металлический цилиндр без искусственной структуры;

частота излучения 3,1 ГГц; начальная фаза волны равна 0°

**Рисунок 4. – Распределение амплитуды напряжённости электрического поля
вблизи объекта цилиндрической формы**

Показано, что на основе точного решения граничной задачи возможно описание как брэгговской дифракции электромагнитных волн на периодической структуре среды, так и учет многократного френелевского отражения волн от границ образца, что позволяет полностью моделировать прохождение

и отражение электромагнитных волн в зависимости от задаваемых параметров искусственной спиральной структуры. В данном случае в качестве оптимальных параметров могут рассматриваться не только параметры элементов, но и параметры многослойной макроспирали.

Установлена аналогия в частотной зависимости волновых чисел метаматериала в СВЧ диапазоне и холестерических жидких кристаллов в оптической области электромагнитного излучения.

Показано, что влияние локального параметра киральности и локального омега-параметра проявляется в сдвиге границ области брэгговского отражения, а также в изменении ширины области брэгговского отражения.

Получена модифицированная формула де Ври для поворота плоскости поляризации электромагнитной волны и построена частотная зависимость угла поворота плоскости поляризации.

Полученные результаты представляют значительный интерес для науки и практики, так как позволяют предсказывать поведение новых метаматериалов и исследовать их электромагнитные свойства; разрабатывать теоретические основы и конструкции преобразователей поляризации электромагнитных волн на основе метаматериалов со спиральной структурой; изготавливать экспериментальные образцы таких сред с рассчитанными оптимальными параметрами и функциональные технические устройства.

Результаты, полученные в ходе исследований, могут быть использованы в радиоэлектронике в разных целях, в частности:

- при конструировании и расчёте преобразователей поляризации электромагнитных волн на основе метаматериалов со спиральной структурой;
- для совершенствования неоднородных метаматериалов, предназначенных для волнового обтекания цилиндрических объектов в СВЧ диапазоне.

В четвертой главе проведены аналитические расчеты, в соответствии с которыми были созданы экспериментальные образцы кирального метаматериала, а также метаматериала с компенсированной киральностью. На примере образцов проведено численное моделирование их электромагнитных свойств, а также сравнение с экспериментальными результатами взаимодействия метаматериала с электромагнитным излучением в дальнем ИК диапазоне. Показано, что оптимальные спирали могут найти в дальнейшем широкое применение, например, для создания безотражательных поглощающих покрытий, а также метаматериалов с отрицательным преломлением электромагнитных волн.

Свойства киральной среды могут быть описаны следующими материальными уравнениями:

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \vec{E} + i\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} \kappa \vec{H}, \quad \vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} - i\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} \kappa \vec{E}. \quad (6)$$

Для метаматериала можно произвести процедуру усреднения полей по областям пространства, размеры которых значительно меньше длины волны, или так называемую гомогенизацию. После этой процедуры можно ввести в рассмотрение эффективные параметры метаматериала, при этом уравнения связи (6) остаются справедливыми. Для изотропной среды с низкой концентрацией включений можно пренебречь взаимодействием между элементами структуры и определить эффективные параметры в соответствии с формулами

$$\varepsilon_r = 1 + N_h \alpha_{ee}, \quad \mu_r = 1 + N_h \alpha_{mm}, \quad \kappa = N_h \alpha_{em}, \quad (7)$$

где N_h – концентрация включений в единице объёма.

Для спиралей "оптимальной" формы, удовлетворяющих соотношению

$$\frac{\omega}{c} |q| r^2 = 2, \quad (8)$$

где c – скорость света в вакууме, мы имеем $\varepsilon_r = \mu_r = 1 \pm \kappa$ (верхний знак соответствует правой спирали). На определённой частоте вблизи главного резонанса спиралей действительные части проницаемостей обращаются в нуль: $\text{Re}\{\varepsilon_r\} = \text{Re}\{\mu_r\} = 0$, поэтому выполняются соотношения

$$\text{Re}\{\kappa\} = \mp 1. \quad (9)$$

Показатели преломления двух циркулярно поляризованных собственных мод для $q > 0$ имеют вид

$$n_+ = 1 + i(\sqrt{\varepsilon_r'' \mu_r''} - \kappa''), \quad n_- = -1 + i(\sqrt{\varepsilon_r'' \mu_r''} + \kappa''), \quad (10)$$

где $\kappa'' > 0$. Так как для оптимальной спирали $\varepsilon_r'' \approx \mu_r'' \approx \kappa''$, то одна из собственных мод имеет показатель преломления, равный единице, и очень низкие потери. Такое же заключение справедливо для собственной моды с противоположной циркулярной поляризацией в случае создания кирального метаматериала на основе левых спиралей. Вторая собственная мода кирального метаматериала характеризуется единичным отрицательным показателем преломления и, кроме того, испытывает поглощение в среде.

Принимая во внимание спиральные траектории электронов проводимости, неоднородность распределения тока вдоль проводника, скин-эффект и ослабление электрического поля в металле, мы можем описать частотную зависимость эффективных параметров изотропного кирального метаматериала следующим образом:

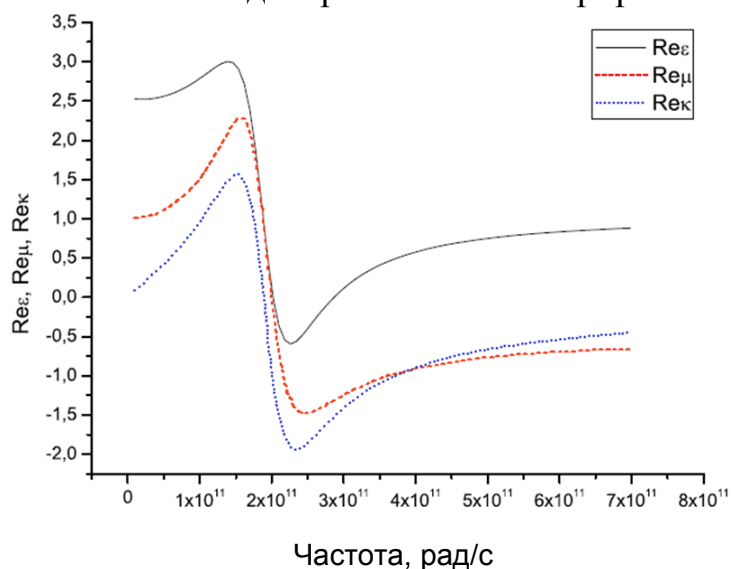
$$\varepsilon_r = 1 + \frac{1}{A \varepsilon_0} \frac{\omega_0^2 - \omega^2 + i\omega\Gamma}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 \Gamma^2}, \quad \mu_r = 1 + \frac{1}{A} \mu_0 B^2 \frac{\omega_0^2 - \omega^2 + i\omega\Gamma}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 \Gamma^2}, \quad \kappa = \frac{1}{A} \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} B \frac{\omega_0^2 - \omega^2 + i\omega\Gamma}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 \Gamma^2}. \quad (11)$$

В формулах (11) использованы обозначения:

$$\frac{1}{A} = \frac{2Ne^2}{\pi m_e} \frac{\tau}{r^2 q^2 + 1}; \quad B = \frac{r^2 q}{2} \omega; \quad \Gamma = \frac{\rho N_0 N_s e^2}{m_e}; \quad N = N_0 N_s N_h V_h; \quad V_h = \pi r_0^2 L, \quad (12)$$

где ω_0 – резонансная частота колебаний; m_e – масса электрона; $-e$ – заряд электрона; τ – коэффициент ослабления поля внутри металла; ρ – удельное сопротивление металла; N_0 – объемная концентрация электронов проводимости в металле; N_s – эффективная объемная концентрация электронов проводимости в металле; r_0 – радиус проволоки; V_h – объём проволоки, из которой изготовлена одна спираль.

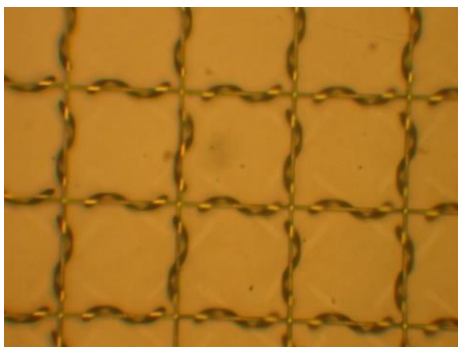
Результаты численного моделирования иллюстрированы на рисунке 5.



$$r = 7,7 \cdot 10^{-4} \text{ м}, \alpha = 13.65^\circ, L = 0,005 \text{ м}, h = 0,0012 \text{ м}, \rho = 1,67 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}, \\ N_h = 2,1 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}, \omega_0 = 18,84 \cdot 10^{10} \text{ рад/с}$$

Рисунок 5. – Зависимость действительной части диэлектрической и магнитной проницаемостей и параметра киральности от частоты для метаматериала на основе оптимальных одновитковых спиралей с правым направлением закручивания

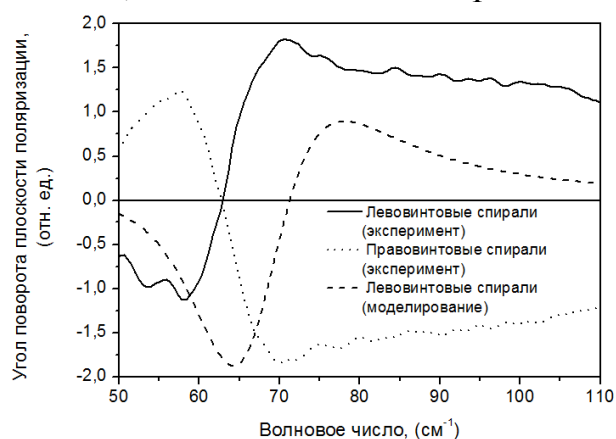
В Институте физики полупроводников имени А.В. Ржанова СО РАН были изготовлены образцы, которые представляют квадратную решётку из спиралей, закреплённых на подложке сеткой из резиста так, что спирали прилегают к подложке и резисту в центре, а остальная часть спирали находится в воздухе (рисунок 6).



На иллюстрации – квадратная сетка – негативный фоторезист из полимерного материала, толщиной около 1 мкм
Рисунок 6. – Фотография метаматериала, реализованного в форме сетки с квадратными ячейками

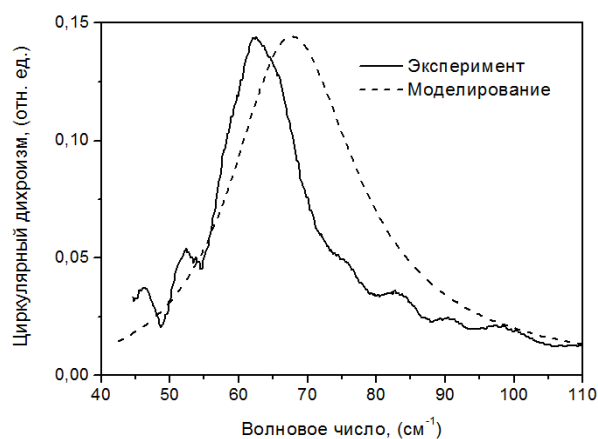
Параметры полосок из плёнки $\text{In}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}/\text{GaAs}/\text{Ti}/\text{Au}$ (16/40/3/65 нм), здесь через дробь указана толщина каждого слоя, использованных для изготовления спиралей, в развёрнутом состоянии следующие: длина – 77 мкм, ширина – 6 мкм. В средней части спираль обращена к подложке стороной $\text{In}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}$. Геометрические параметры реализованной структуры следующие: угол подъёма спирали – $(52\text{--}53)^\circ$; диаметр спирали – 11 мкм; период структуры 84 мкм. Используемый угол подъёма спирали является оптимальным для получения образцов с максимально выраженными гиротропными свойствами, как показано в [23, 85].

Были изготовлены образцы разных размеров (максимальный – 2 см × 3 см) на подложке из нелегированного GaAs (толщина подложки 400 мкм). На рисунках 7, 8 приведены результаты экспериментальных исследований и численного моделирования свойств метаматериала. Параметры структуры для моделирования были выбраны соответствующими экспериментальным образцам: $\delta_1 = 6 \cdot 10^{-6}$ м, $\delta_2 = 65 \cdot 10^{-9}$ м, $L = 14,4 \cdot 10^{-6}$ м, $\alpha = 53^\circ$, $\omega_0 = 12,6 \cdot 10^{12}$ рад/с, $\rho = 2,42 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, $N_h = 0,98 \cdot 10^{13}$ м⁻³, где δ_1 – ширина полоски проводника в пленке, δ_2 – длина полоски проводника в пленке.



Одной единице на оси ординат соответствует 5°. Наблюдение навстречу волне, направление отсчёта положительных значений угла – по часовой стрелке

Рисунок 7. – Спектральная зависимость угла поворота плоскости поляризации излучения, прошедшего сквозь метаматериал на основе спиралей

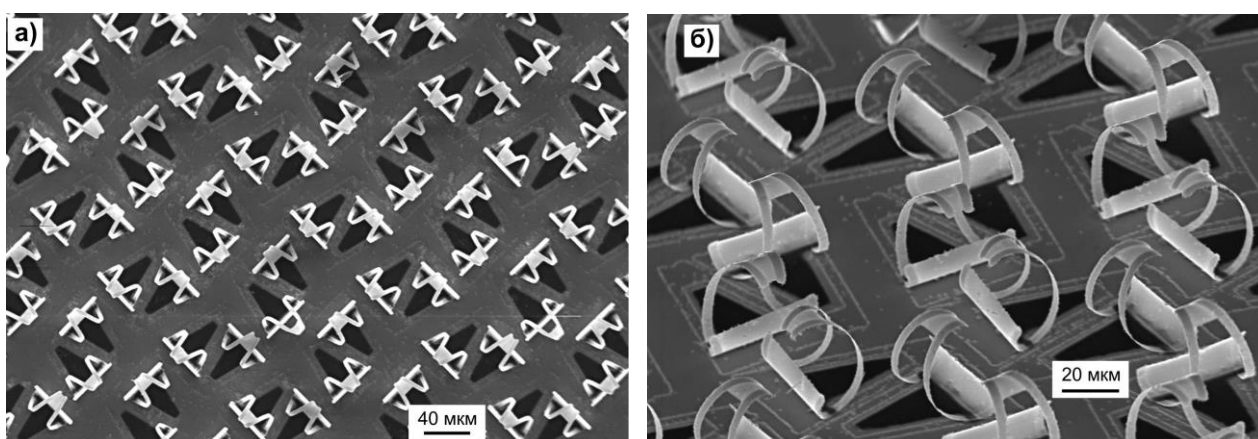


Сплошная линия – результаты расчёта на основе экспериментальных данных; штриховая линия – результаты численного моделирования
Рисунок 8. – Зависимость величины циркулярного дихроизма метаматериала на основе левовинтовых спиралей от частоты падающего излучения

Показано, что предложенная модель удовлетворительно описывает свойства метаматериала с большой киральностью. Максимальные значения угла поворота плоскости поляризации волны и циркулярного дихроизма, рассчитанные на основании предложенной модели, соответствуют наблюдаемым в эксперименте. Частотная зависимость рассчитанных величин,

характеризующих киральные свойства среды, вблизи резонанса качественно согласуется с экспериментальными данными.

Были также рассчитаны и практически реализованы метаматериалы с компенсированной киральностью на основе парных спиралей с различным направлением закручивания. Были изготовлены образцы, которые представляют собой решетку из правых и левых металлических спиралей на полупроводниковых каркасах, пары спиралей располагаются горизонтально и вертикально в плоскости образца (рисунок 9). На рисунке 9 представлено изображение образца, полученное методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с разным увеличением и с разных ракурсов.



а) вид сверху; б) вид под углом

Рисунок 9. – СЭМ-изображение метаматериала, образованного одновитковыми спиральями на основе плёнки из $\text{In}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}/\text{GaAs}/\text{Ti}/\text{Au}$ (16/40/3/65 нм)

Параметры развернутых полосок, использованных при изготовлении отдельных спиралей с оптимальным углом подъёма ($13,5^\circ$) и радиусом 12,4 мкм, следующие: длина – 65 мкм, ширина – 3 мкм. Полоски сделаны из плёнки $\text{In}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}/\text{GaAs}/\text{Ti}/\text{Au}$ (16/40/3/65 нм). Концентрация спиралей в массиве – $2,3 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-3}$. Указанное значение угла подъёма спирали, как показано в [26, 32], оптимально для обеспечения равенства электрической и магнитной поляризуемостей спирали.

Были произведены экспериментальные исследования свойств изготовленных образцов, результаты которых иллюстрированы на рисунке 10, на котором приведены также результаты численного моделирования свойств метаматериала. Параметры структуры для моделирования были выбраны соответствующими экспериментальным образцам: $L = 65 \cdot 10^{-6} \text{ м}$; $\alpha = 13,5^\circ$; $\omega_0 = 12,6 \cdot 10^{12} \text{ рад/с}$; $\rho = 2,42 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$; $N_h = 2,3 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-3}$. Таким образом, создан образец поглощающего, но слабоотражающего метаматериала с компенсированной киральностью на основе парных гладких спиралей с оптимальными параметрами.

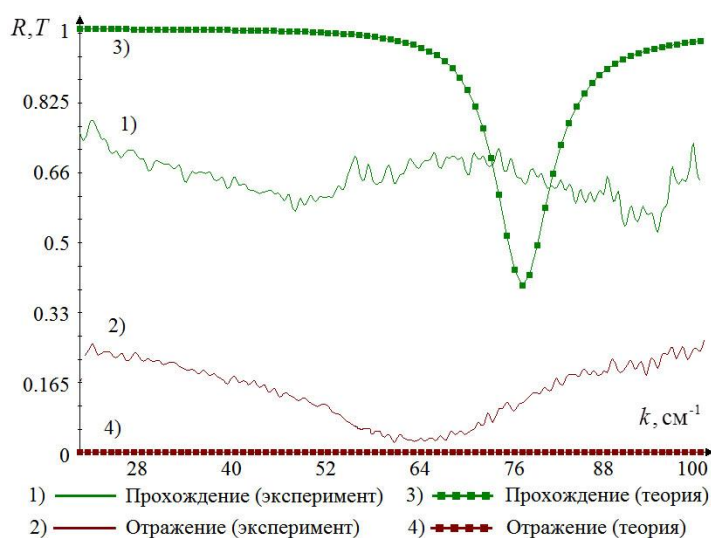


Рисунок 10. – Зависимость коэффициентов отражения и прохождения волн для метаматериала от волнового числа

Показано, что полученный метаматериал на основе массива парных спиралей проявляет одинаково значимые диэлектрические и магнитные свойства, которые обусловлены оптимальной формой спиралей. В то же время киральные свойства искусственной структуры являются скомпенсированными, поскольку используются парные оптимальные спирали с правым и левым направлением закручивания. В результате созданный метаматериал обладает в терагерцовом диапазоне волновым импедансом, близким к импедансу свободного пространства.

Решена граничная задача и проведены расчеты для определения коэффициентов отражения и прохождения электромагнитной волны в зависимости от параметров образца. Решение граничной задачи подтверждает, что вблизи ранее определенной резонансной частоты образец проявляет слабые отражательные свойства.

Показано, что на основе полученных результатов возможна разработка и создание метаматериалов в ТГц диапазоне, состоящих из оптимальных спиральных элементов. Возможно также создание новых метаматериалов с отрицательным показателем преломления для реализации плоской «линзы» в терагерцовом диапазоне.

Также аналитически решена граничная задача для двухслойной поглощающей структуры в воздухе, проведено численное моделирование свойств структуры метаматериал-подложка (рисунок 11), а также выполнено сравнение с экспериментально полученными коэффициентами отражения и прохождения электромагнитного излучения в ТГц диапазоне.

В новом образце метаматериала на подложке улучшена однородность слоев, а также уменьшена толщина слоя золота, что привело к более существенному поглощению ТГц волн.

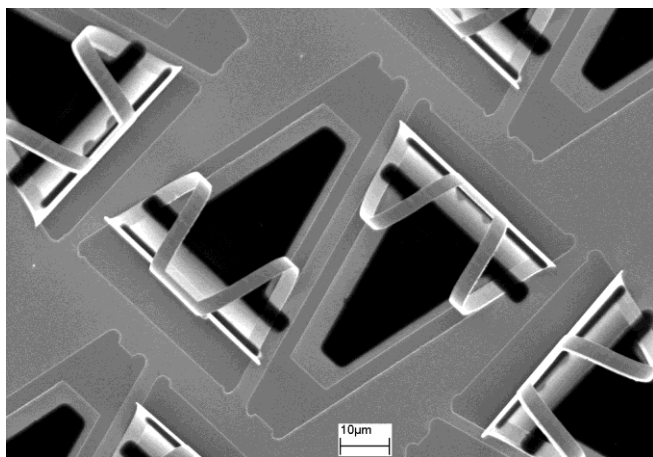


Рисунок 11. – СЭМ-изображение метаматериала, состоящего из сформированных $\text{In}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}/\text{GaAs}/\text{Ti}/\text{Au}$ (16/40/4/40 нм) одновитковых спиралей

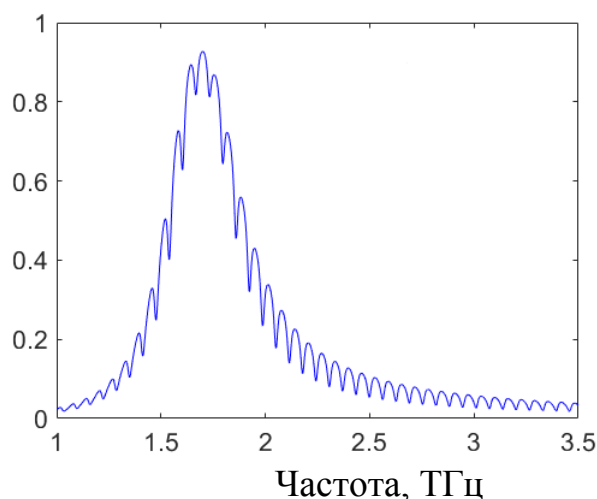


Рисунок 12. – Зависимость коэффициента поглощения волн для структуры метаматериал-подложка от частоты падающего излучения

Показано, что вблизи ранее определенной резонансной частоты образец проявляет слабые отражательные свойства. В то же время имеет место существенное поглощение волн вблизи резонансной частоты, хотя подложка является прозрачной в рассматриваемом диапазоне частот (рисунок 12). Такие поглощательные свойства метаматериала являются следствием резонансного возбуждения токов в проводящих спиралях, содержащих слой золота.

В пятой главе приведены результаты, полученные в процессе исследования проблемы взаимодействия электромагнитного поля с биологическими структурами, имеющими спиральную форму, такими как ДНК, белки и др. На основе классической теории дипольного излучения предложена модель, описывающая механизм излучения электромагнитных волн произвольным участком двойной правовинтовой спирали ДНК. Особое внимание уделено поляризационной селективности излучаемых электромагнитных волн.

В отличие от традиционного подхода, используемого при рассмотрении спиральных излучателей, не ставится задача определения электрического тока в спирали в явном виде. Электромагнитное поле, создаваемое спиралью, рассматривается как результат излучения электрических дипольных моментов и магнитных моментов, возникающих в половине каждого витка спирали. Показано, что эти моменты создаются неотрывно друг от друга и связаны между собой универсальным соотношением. Найденное соотношение между электрическим дипольным моментом и магнитным моментом выполняется при любых микротоках, существующих в ДНК, то есть при любой последовательности нуклеотидов (азотистых оснований). Следовательно, поляризационная селективность также является универсальным свойством излучаемой волны.

Особый интерес представляет случай, когда электрический дипольный момент и магнитный момент дают равные по абсолютной величине вклады в излучаемую волну. В этом случае электромагнитная волна, излучаемая ДНК, является поляризованной по кругу.

Рассматривается главный резонанс периодической спиральной структуры, когда длина излучаемой волны приблизительно равна длине витка P спирали ДНК:

$$\lambda_{рез} = P. \quad (13)$$

Показано, что в условиях резонанса все многообразие спиральных структур с их различными геометрическими размерами можно характеризовать только одним параметром. Таким параметром, достаточным для описания спиральных структур, является угол подъема спирали относительно плоскости, ортогональной оси спирали. Определен угол подъема спирали, необходимый для излучения ею поляризованной по кругу электромагнитной волны на основе классической теории дипольного излучения и в рамках энергетического подхода. Рассмотрена распространяющаяся вдоль оси OZ циркулярно поляризованная волна, которой соответствуют вектор \vec{E} , вращающийся в плоскости $ХОУ$, и волновой вектор \vec{k} . Ось спирали направлена вдоль оси OX , как показано на рисунке 13.

На рисунке 14 представлена зависимость отношения $\langle W \rangle = \langle W \rangle_i^R / \langle W \rangle_i^L$ энергий длинной спирали в поле правой $\langle W \rangle_i^R$ и левой $\langle W \rangle_i^L$ циркулярно поляризованных волн от угла подъема спирали. Положение экстремума функции $\langle W \rangle = f(\alpha)$ соответствует оптимальному углу подъема спирали $\alpha_{опт} = 24,5^\circ$.

Проведено доказательство поляризационной селективности ДНК по отношению к циркулярным волнам на основе спиральной модели молекул кирального вещества. Произведено сравнение рассчитанного угла подъема спирали с известными экспериментально установленными характеристиками ДНК. Относительное различие значений угла подъема спирали ДНК, найденного указанными способами, составило (2,1 – 13,9) %, что можно признать хорошим соответствием теории и эксперимента.

Рассмотрен некоторый активированный участок ДНК, длина которого превышает длину половины витка спирали. Определено электромагнитное поле, создаваемое таким участком ДНК в окружающем пространстве, с учетом запаздывания электромагнитных волн, излучаемых различными полувитками спирали. Установлено, что в условиях главного резонанса поляризация суммарной электромагнитной волны очень близка к круговой. Показано, что это свойство имеет место при любой длине активированного участка ДНК. При этом вектор напряженности электрического поля излучаемой волны образует в пространстве левый винт.

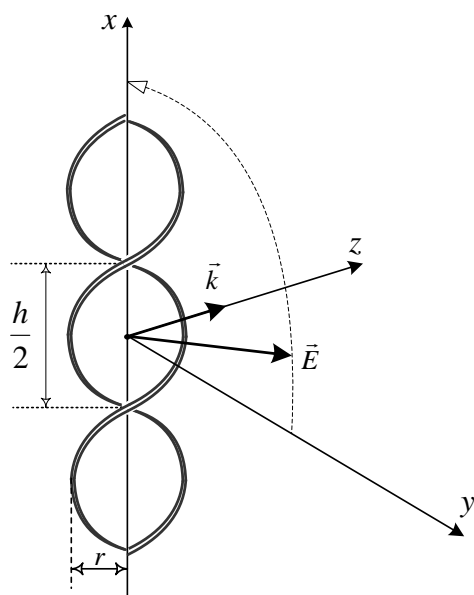


Рисунок 13. – Молекула ДНК в поле циркулярно поляризованной электромагнитной волны

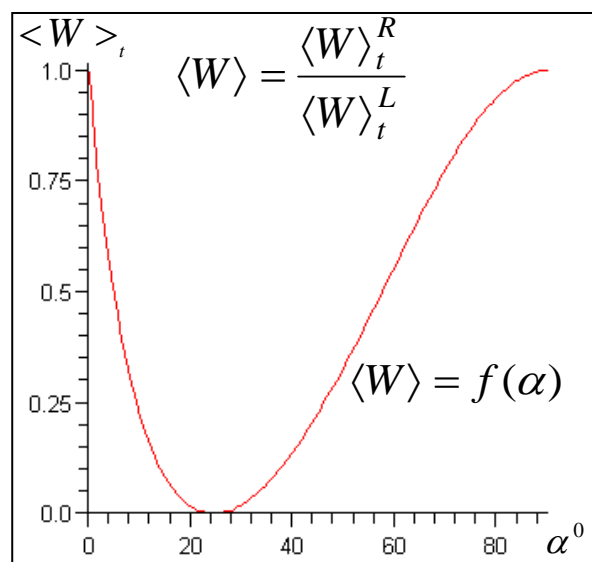


Рисунок 14. – Отношение энергий правой спирали в поле правой и левой циркулярно поляризованных волн как функция угла подъёма спирали

Можно предположить, что рассмотренный эффект поляризационной селективности электромагнитного поля ДНК имеет важное значение для генетического сохранения различий между правовинтовыми и левовинтовыми формами объектов живой природы.

Круговая волна с правовинтовой поляризацией не излучается ДНК в условиях резонанса. В соответствии с принципом обратимости, такая волна не может индуцировать электрических и магнитных моментов в ДНК, то есть не может оказывать воздействия на ДНК. Следовательно, актуализируется вопрос о необходимости более широкого применения право-поляризованных круговых электромагнитных волн в радиотехнике, электронике, оптике и нанотехнологиях в целях охраны здоровья человека. Кроме того, электромагнитные волны с круговой поляризацией могут быть использованы в биологии, химии и медицине для активизации процессов с участием молекул и молекулярных соединений со спиральной структурой.

Проведено экспериментальное исследование двойных и одинарных ДНК-подобных спиралей в сверхвысокочастотном диапазоне. На основе принципа электродинамического подобия показано, что эффект поляризационной селективности, наблюдаемый для ДНК-подобных спиралей в СВЧ диапазоне длин волн, для молекулы ДНК может иметь место в нанометровом диапазоне.

Этот эффект является одним из определяющих для ДНК (возможно и для других спиральных объектов) и напрямую связан с нарушением зеркальной симметрии в природных структурах и явлениях.

Обладая оптимальной геометрической формой, молекула ДНК не подвержена воздействию правой циркулярно поляризованной

электромагнитной волны в нанометровом диапазоне. Такая волна, для которой правосторонняя молекула ДНК является “прозрачной”, должна распространяться перпендикулярно оси спирали и образовывать в пространстве правый винт. Соответственно волна, излучаемая правосторонней молекулой ДНК перпендикулярно оси спирали при условии резонанса, имеет левую циркулярную поляризацию. Эти особенности могут быть использованы при создании ДНК-подобных метаматериалов с селективными поляризационными свойствами.

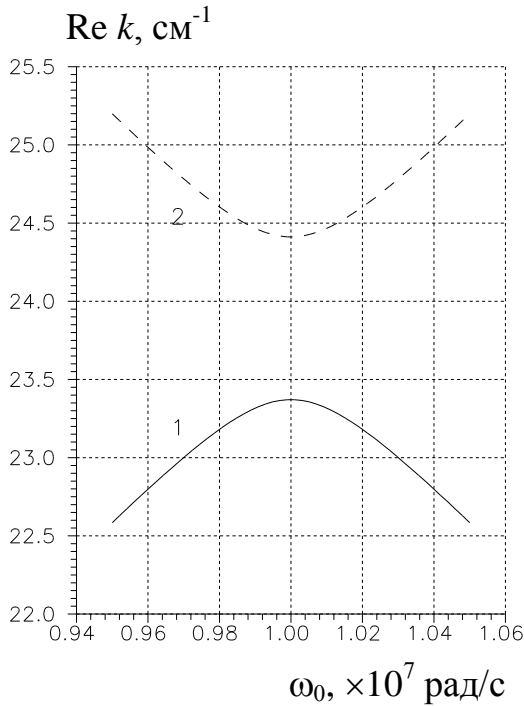
Впервые заявлено преимущество двухцепочечной ДНК-подобной спирали как оптимального кругового поляризатора в направлении распространения волны, перпендикулярном к оси спирали. Аналогичное явление имеет место и при распространении волны вдоль оси спирали. Оно исследовано с достаточной полнотой и используется в технике антенн.

Для волн, излучаемых в перпендикулярном к оси спирали направлении, обнаружено, что этот эффект поляризационной селективности имеет свой максимум для некоторой определенной геометрии (формы) спирали, который напоминает двойную спираль (бифилярную), подобную ДНК по углу подъема.

В шестой главе показано, что среды с индуцированной вращающейся пространственно однородной акустической анизотропией представляют собой акустический аналог пространственно-периодических сред и в них проявляются эффекты, характерные для последних.

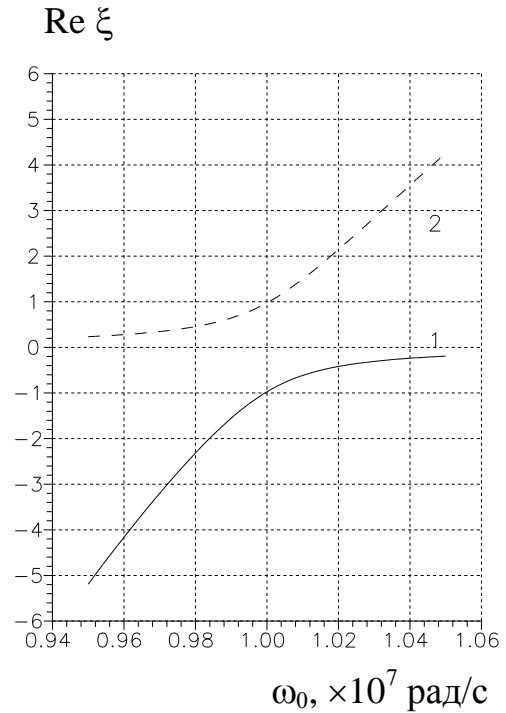
Рассмотрено формирование анизотропии упругих свойств под действием внешнего вращающегося электрического поля. Определены классы кристаллов, симметрия которых допускает формирование вращающейся акустической анизотропии. Проведено подробное исследование влияния вязкости среды на акустические свойства кристалла с вращающейся анизотропией. С учетом поглощения определены волновые числа и эллиптичности собственных акустических волн (рисунки 15, 16).

Показано, что в условиях резонансного взаимодействия ультразвука с вращающимся электрическим полем может иметь место эффект подавления поглощения ультразвука. При этом волновые числа собственных мод акустического поля становятся действительными, если напряженность электрического поля превышает определенное пороговое значение. Следовательно, вязкость среды оказывает влияние только на фазовую скорость собственных акустических волн, распространяющихся без затухания. Это пороговое значение напряженности электрического поля найдено с учетом эффекта электропоглощения, то есть влияния поля на вязкость среды. Решена задача о прохождении акустической волны через кристалл с индуцированной вращающейся акустической анизотропией. Изучен эффект вращения главной оси эллипса поляризации ультразвука (рисунки 17, 18).



1 – $\text{Re} k_1$; 2 – $\text{Re} k_2$; $\Omega = 10^7$ рад/с

Рисунок 15. – Зависимость действительной части волнового числа собственных мод акустического поля от частоты падающей волны



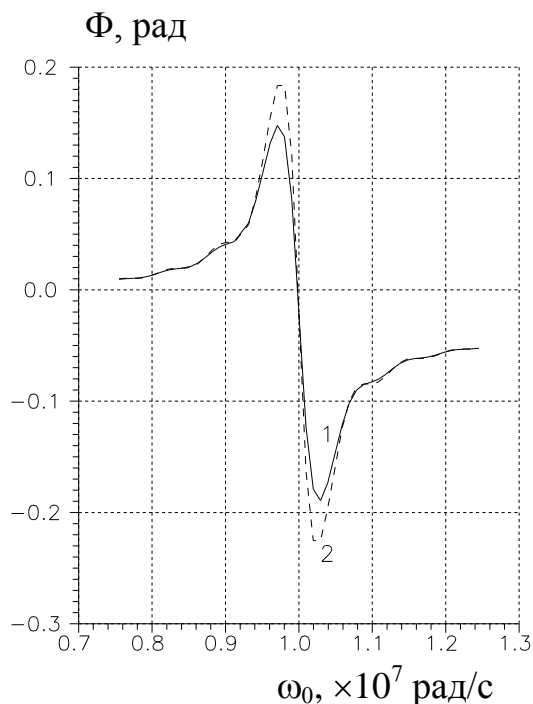
1 – $\text{Re} \xi_1$; 2 – $\text{Re} \xi_2$; $\Omega = 10^7$ рад/с

Рисунок 16. – Зависимость действительной части эллиптичности собственных мод акустического поля от частоты падающей волны

Взаимодействие ультразвука с вращающимся электрическим полем в веществах с аномально высоким значением диэлектрической проницаемости исследовано в так называемом двухволновом приближении, а также на основе точного решения граничной задачи. При этом учтены все четыре моды акустического поля и, следовательно, принято во внимание отражение ультразвука от границ кристалла. Исследовано явление вращения азимута поляризации ультразвука и показано, что угол поворота главной оси эллипса поляризации обращается в нуль в случае совпадения частоты ω_0 падающей волны и частоты Ω вращающегося электрического поля (рисунки 17, 18).

Изучена зависимость интенсивности прошедшей и обращённой волн от толщины кристалла и частоты падающей волны, получены условия, при которых реализуются максимальные и минимальные значения интенсивности названных волн, и на их основе определены необходимые для этого толщины кристалла.

Граничная задача решена путем одновременного удовлетворения условиям непрерывности для связанных волн на двух различных частотах. Изменение разности фаз этих волн может привести к изменению их амплитуд и, следовательно, интенсивностей обращенной и прошедшей волн. Такая ситуация имеет место при описании взаимодействия упругих волн с вращающимся электрическим полем в сегнетокерамике на основе титаната бария.



$L = 2$ см; $\Omega = 10^7$ рад/с;
1, 2 – с учётом и без учёта вязкости
Рисунок 17. – Зависимость угла поворота азимута поляризации для акустической волны от частоты падающего излучения

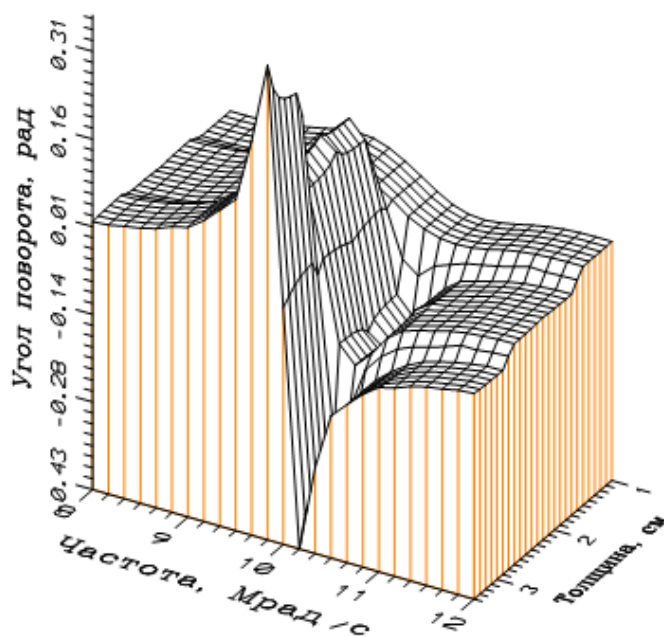


Рисунок 18. – Зависимость угла поворота азимута поляризации для акустической волны от частоты падающего излучения и толщины кристалла, рассчитанная при $\Omega = 10^7$ рад/с

Если напряженность электрического поля превышает пороговое значение и взаимодействие является резонансным по частоте и поляризации, то все собственные моды имеют действительные волновые числа, несмотря на наличие вязкости среды. Следовательно, можно говорить об эффекте подавления поглощения ультразвука вращающимся электрическим полем. В отличие от обычного случая усиления волн, волновые числа не имеют мнимых частей. В то же время согласованное решение граничной задачи для связанных волн на двух различных частотах описывает эффекты генерации обратной волны и усиления прошедшей волны. При этом имеет место немонотонная зависимость интенсивностей и фаз всех волн от длины образца сегнетокерамики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

В результате диссертационного исследования получены следующие новые научные результаты, в совокупности, составляющие основу для развития нового научного направления – проектирования метаматериалов и спирально-структурированных систем с оптимальными параметрами:

1. Для спиральных элементов метаматериалов получено соотношение, связывающее проекции электрического дипольного момента и магнитного момента на ось спирали. Показано, что полученное соотношение является универсальным и выполняется при любом распределении плотности тока в спиральном элементе, включая сильно неоднородные токи, обусловленные скин-эффектом и резонансными явлениями, условия которых определяются параметрами спирального элемента. Универсальность полученного соотношения заключается также в том, что независимо от причины изменения тока в каждом спиральном элементе – в результате прямого воздействия падающей электромагнитной волны или под влиянием других спиральных элементов, образующих структуру, – компоненты электрического дипольного момента p_x и магнитного момента m_x изменяются согласованно, и полученное соотношение остается правильным. Оно может быть использовано при проектировании метаматериалов с высокой концентрацией спиральных элементов в искусственной структуре [21, 22, 38].

2. Определены параметры спирального элемента, при которых возможно излучение циркулярно поляризованной волны и при которых в нем возникают одинаково значимые электрический дипольный момент и магнитный момент при резонансном воздействии электромагнитного поля. Показано, что для спирального элемента с оптимальными параметрами все три поляризуемости, характеризующие его как бианизотропную частицу, равны: диэлектрическая, магнитная и киральная, и что в условиях главного резонанса оптимальные параметры спирального элемента однозначно определяются углом подъема и числом витков и не зависят от длины волны электромагнитного поля, тем самым достигается применимость оптимальных параметров к различным частотным диапазонам [20, 21, 27].

3. Разработаны теоретические основы устройств на основе метаматериалов со спиральной структурой, предназначенных для преобразования поляризации электромагнитных волн СВЧ диапазона, в том числе для трансформации линейно поляризованной волны в циркулярно поляризованную. Показано, что свойства исследованных спиральных элементов оптимальны при активации как электрическим, так и магнитным полем, то есть не зависят от азимута поляризации падающей волны. В этом состоит преимущество оптимальных спиральных элементов перед другими возможными структурными элементами метаматериалов, например, прямолинейными вибраторами и кольцевыми резонаторами [17, 20, 21].

4. Найдено аналитическое решение волнового уравнения для электромагнитного поля, распространяющегося в многослойном метаматериале, созданном на основе упорядоченно расположенных

спиральных и омега-элементов. Показано, что на основе точного решения граничной задачи возможны как описание брэгговской дифракции электромагнитных волн на периодической структуре метаматериала, так и учёт многократного френелевского отражения волн от границ образца, тем самым методически обеспечена возможность полного моделирования прохождения и отражения электромагнитных волн с учётом задаваемых параметров метаматериала. Показано, что влияние локального параметра киральности и локального омега-параметра проявляется в сдвиге границ области брэгговского отражения, а также в изменении ширины области брэгговского отражения. Получена модифицированная формула де Ври для определения угла поворота плоскости поляризации электромагнитной волны [3, 4, 10].

5. Определен оптимальный угол подъёма витков спиральных элементов метаматериала, при котором обеспечивается максимальное значение среднего параметра киральности структуры. В результате численного моделирования свойств кирального метаматериала на основе упорядоченных одновитковых спиральных элементов с углом подъёма 53° , а также экспериментального исследования взаимодействия метаматериала с электромагнитным излучением в дальнем ИК диапазоне показано, что в рамках предложенной модели удовлетворительно описываются свойства метаматериала с большой киральностью. Установлено, что максимальные значения угла поворота плоскости поляризации волны и циркулярного дихроизма, рассчитанные на основе предложенной модели, соответствуют наблюдаемым в эксперименте [20, 21, 38, 39].

6. На основе парных спиральных элементов с оптимальными параметрами разработаны и созданы слабоотражающие поглощающие метаматериалы с компенсированной киральностью. Показано, что полученные метаматериалы проявляют одинаково значимые диэлектрические и магнитные свойства, которые обусловлены оптимальной формой спиральных элементов. В то же время киральные свойства метаматериалов являются скомпенсированными, поскольку используются парные оптимальные спиральные элементы с правым и левым направлением закручивания. В результате созданные метаматериалы обладают в дальнем ИК диапазоне волновым импедансом, близким к импедансу свободного пространства [27, 33, 47].

7. Определено влияние параметров образца на коэффициенты отражения и прохождения при взаимодействии электромагнитных волн с метаматериалом с компенсированной киральностью, изготовленным по специальной технологии и содержащим спиральные элементы, которые состоят из металлического, полупроводникового и диэлектрического слоёв. В результате аналитических и численных расчётов, а также экспериментальных исследований подтверждено, что вблизи резонансной частоты образец

характеризуется низким коэффициентом отражения и значительным коэффициентом поглощения [47, 58, 60].

8. Доказана поляризационная селективность взаимодействия ДНК-подобных спиралей с СВЧ излучением и показано, что в соответствии с принципом электродинамического подобия она может иметь место для молекулы ДНК в глубоком УФ диапазоне. Высказана гипотеза, что этот эффект является одним из определяющих для ДНК и связан с нарушением зеркальной симметрии в природных структурах и явлениях. Этот результат имеет большое значение при решении задач, связанных с сохранением генетических различий между правовинтовыми и левовинтовыми формами объектов живой природы [22, 31, 34, 36, 37].

9. Обосновано, что обладающая оптимальной геометрической формой молекула ДНК в глубоком УФ диапазоне не чувствительна к воздействию правоциркулярно поляризованной электромагнитной волны. Соответственно волна, излучаемая в условиях резонанса правовинтовой молекулой ДНК перпендикулярно оси спирали, левоциркулярно поляризована [22, 31, 36].

10. Впервые установлено преимущество двухцепочечной ДНК-подобной спирали как оптимального кругового поляризатора для волны, распространяющейся в направлении, перпендикулярном оси спирали [34, 37, 44].

Рекомендации по практическому использованию результатов диссертации

Результаты представляют значительный интерес для науки и практики, так как на их основе можно:

- предсказывать и исследовать электромагнитные свойства новых метаматериалов;
- разрабатывать теоретические основы преобразователей поляризации электромагнитных волн, создаваемых на основе композитных сред со спиральной и омега-структурой;
- изготавливать такие среды на основе элементов с рассчитанными оптимальными параметрами.

Результаты работы могут быть использованы при расчётах и создании слабо отражающих экранов, создании поглощающих покрытий на основе спирально-структурированных систем, при создании частотных и поляризационно-селективных фильтров и преобразователей поляризации в СВЧ и дальнем ИК диапазонах.

Результаты исследований, изложенные в главе 3, могут быть использованы в радиоэлектронике при конструировании и расчёте преобразователей поляризации электромагнитных волн на основе композитных сред со

спиральной и омега-структурой. В диссертации предложен вариант преобразователя поляризации электромагнитных волн, который отличается от известных преобразователей значительно расширенным частотным диапазоном работы [127, 128].

На основе результатов исследований, описанных в главе 4, возможны разработка и создание метаматериалов, состоящих из оптимальных спиральных элементов и предназначенных для применения в дальнем ИК диапазоне. Возможно также создание слабо отражающих поглощающих покрытий и новых метаматериалов с отрицательным показателем преломления, для реализации плоской «линзы», функционирующей в дальнем ИК диапазоне.

На основе оптимальных спиральных элементов возможна реализация тонкой поглощающей метаповерхности, которая не отражает волны в широком частотном диапазоне, в то время как коэффициент прохождения имеет узкий пик в полосе полного поглощения. Такая метаповерхность реализуется использованием киральных частиц в элементарных ячейках, расположенных в периодическом плоском рацемическом массиве, что компенсирует киральность на макроскопическом уровне. Такой подход имеет широкий диапазон возможных применений во всем спектре электромагнитных волн в том числе, например, при создании совершенных компактных волновых фильтров, новых видов болометров, селективных многочастотных сенсоров [58].

Возможна разработка болометра, который измеряет мощность падающего излучения различных спектральных линий одновременно. Узкополосный отклик предложенных поглотителей делает их идеальными кандидатами для использования в болометрических массивах в астрономии для волн дальнего ИК диапазона.

Благодаря безотражательному принципу действия, предложенные поглотители могут быть успешно использованы для стелс-приложений, особенно для немаetalлических объектов. В отличие от обычных поглотителей на металлической поверхности, они не увеличивают эффективную площадь рассеяния скрытого объекта за пределами полосы поглощения [58].

Результаты исследований, произведённых в главе 5, из которых следует, что обладающая оптимальной геометрической формой молекула ДНК в нанометровом диапазоне не чувствительна к воздействию правоциркулярно поляризованной электромагнитной волны, будут использованы при создании ДНК-подобных метаматериалов с селективными поляризационными свойствами.

Результаты исследований, изложенные в главе 6, могут быть использованы для разработки усилителей и генераторов ультразвука, действие которых основано на электроакустических эффектах, обусловленных в кристаллах вращающимся электрическим полем. Коэффициент усиления акустических

волн при выборе оптимальной толщины кристалла может достигать значений порядка $10^4 \div 10^5$ [125, 126].

Результаты, представленные в диссертационной работе, используются в учебном процессе факультета физики и информационных технологий УО «Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины» при подготовке студентов специальностей «Физика (по направлениям)», «Физическая электроника» (имеется 5 актов внедрения результатов в учебный процесс, копии которых представлены в приложениях А–Д), в ОАО «Интеграл», ЗАО «Группа Кремний Эл» (имеется 2 акта о практическом использовании результатов исследования в промышленности, копии которых представлены в приложениях Е, Ж).

Список публикаций соискателя по теме диссертации **Монография**

1. Семченко, И. В. Объемные акустические волны в кристаллах во вращающемся электрическом поле: монография / И. В. Семченко, С. А. Хахомов – Минск: Беларуская навука, 1998. – 150 с.

Главы в книгах

2. Semchenko, I. V. The influence of induced chiral properties on the transformation of polarization of acoustic waves in piezoelectric semiconductors / I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov // *Advances in Complex Electromagnetic Materials* / Ed. by A. Priou [et al.]. – Kluwer Academic Publishers. – 1997. – P. 219 – 226.

3. Semchenko, I. V. Propagation of electromagnetic waves in artificial anisotropic uniform and twisted omega-structures / I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov // *Advances in Electromagnetics of Complex Media and Metamaterials* / Ed. by Said Zouhdi, Ari Sihvola and Mohamed Aرسالane, Kluwer Academic Publishers. – 2002. – P. 197 – 210.

4. Semchenko, I. V. The competition of Bragg reflection and Fresnel's reflection of electromagnetic waves in the artificial helicoidal bianisotropic media with local chirality / I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov // *Advances in Electromagnetics of Complex Media and Metamaterials* / Ed. by Said Zouhdi, Ari Sihvola and Mohamed Aرسالane, Kluwer Academic Publishers. – 2002. – P. 307–318.

5. Semchenko, I. V. Effective electron model of the wire helix excitation at microwaves: first step to optimization of pitch angle of helix / I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov, E. A. Fedosenko // *Advances in Electromagnetics of Complex Media and Metamaterials* / Ed. by Said Zouhdi, Ari Sihvola and Mohamed Aرسالane, Kluwer Academic Publishers. – 2002. – P. 245 – 258.

6. The effective optimal parameters of metamaterial on the base of omega-elements / I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov, A.L. Samofalov, M.A. Podalov, Q. Songsong // *Recent Global Research and Education: Technological Challenges* /

Ed. by Ryszard Jablonski and Roman Szewczyk, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, Vol. 519, Springer. – 2017. – P. 3 – 9.

Статьи в рецензируемых журналах

7. Семченко, И. В. Влияние дрейфа носителей заряда на резонансное взаимодействие акустических волн с вращающимся электрическим полем в пьезополупроводниках / И. В. Семченко, С. А. Хахомов // *Кристаллография*. – 1997. – Т. 42. – № 2. – С. 221 – 224.

8. Reflection and transmission by a uniaxially bi-anisotropic slab under normal incidence of plane waves / I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov, S. A. Tretyakov, A. H. Sihvola, E. A. Fedosenko. – *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 1998. – Vol. 31. – № 19. – P. 2458 – 2464.

9. Reply to comment on “Reflection and transmission by a uniaxially bi-anisotropic slab under normal incidence of plane waves” / S. A. Tretyakov, A. H. Sihvola, I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov. – *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 1999. – Vol. 32. – № 20. – P. 2705 – 2706.

10. Microwave analogy of optical properties of cholesteric liquid crystals with local chirality under normal incidence of waves / S. A. Tretyakov, A. H. Sihvola, I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov. – *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 1999. – Vol. 32. – № 24. – P. 3222 – 3226.

11. Electromagnetic waves in artificial chiral structures with dielectric and magnetic properties / I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov, S. A. Tretyakov, A. H. Sihvola. – *Electromagnetics*. – 2001. – Vol. 21. – № 5. – P. 401 – 414.

12. Семченко, И. В. Отражение и прохождение электромагнитных волн при нормальном падении на би-анизотропную Ω -структуру / И. В. Семченко, С. А. Хахомов // *Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины*. – 2001. – № 6(9). – С. 26 – 32.

13. Семченко, И. В. Электромагнитные волны в поглощающих искусственных гиротропных средах с анизотропией диэлектрических и магнитных свойств / И. В. Семченко, С. А. Хахомов, Е. А. Федосенко // *Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины*. – 2001. – № 6(9). – С. 33 – 38.

14. Semchenko, I. V. Artificial uniaxial bi-anisotropic media at oblique incidence of electromagnetic waves / I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov // *Electromagnetics*. – 2002. – Vol. 22. – № 1. – P. 71 – 84.

15. Семченко, И. В. Взаимодействие электромагнитных волн с искусственными киральными объектами – новая область электродинамики / И. В. Семченко, С. А. Хахомов // *Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины*. – 2005. – № 3(30). – С. 29 – 37.

16. Семченко, И. В. Объемные акустические волны ультразвукового диапазона в кристаллах во вращающемся электрическом поле / И. В. Семченко, С.А. Хахомов // Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. – 2005. – № 3(30). – С. 38 – 49.

17. Семченко, И. В. Оптические свойства гиротропных слоисто-периодических сред / И. В. Семченко, С. А. Хахомов // Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. – 2005. – № 4(31). – С. 153 – 156.

18. Semchenko, I. V. Polarization plane rotation of electromagnetic waves by the artificial periodic structure with one-turn helical elements / I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov, A. L. Samofalov // Electromagnetics. – 2006. – Vol. 26. – № 3 – 4. – P. 219 – 233.

19. Яковцов, И. Н. Исследование амплитудно-частотных характеристик пьезокерамического элемента на основе соединения цирконий – титанат – свинец / И. Н. Яковцов, С. Д. Барсуков, С. А. Хахомов // Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. – 2006. – № 6(39). – Ч. 1. – С. 147 – 151.

20. Хахомов, С. А. Получение циркулярно-поляризованной отраженной волны с помощью искусственной плоской решетки из одновитковых спиралей / С. А. Хахомов, А. Л. Самофалов, С. А. Третьяков // Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. – 2006. – №6 (39). – Ч. 2. – С. 87 – 90.

21. Семченко, И. В. Преобразование поляризации электромагнитных волн спиральными излучателями / И. В. Семченко, С. А. Хахомов, А. Л. Самофалов // Радиотехника и электроника. – 2007. – Т. 52. – № 8. – С. 917 – 922.

22. Семченко, И. В. Поляризационная селективность электромагнитного излучения ДНК / И. В. Семченко, С. А. Хахомов, А. П. Балмаков // Радиотехника и электроника. – 2007. – Т. 52. – № 9. – С. 1078 – 1083.

23. Излучение циркулярно поляризованных СВЧ волн плоской периодической структурой из Ω -элементов / И. В. Семченко, С. А. Хахомов, М. А. Подалов, С. А. Третьяков // Радиотехника и электроника. – 2007. – Т. 52. – № 9. – С. 1084 – 1088.

24. Modeling of Spirals with Equal Dielectric, Magnetic, and Chiral Susceptibilities / E. Saenz, I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov, K. Guven, R. Gonzalo, E. Ozbay, S. Tretyakov. – Electromagnetics. – 2008. – Vol. 28. – № 7. – P. 476 – 493.

25. Semchenko, I. V. Chiral metamaterial with unit negative refraction index / I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov, S. A. Tretyakov // The European Physical Journal Applied Physics. – 2009. – Vol. 46. – № 3. – P. 32607-1 – 32607-4.

26. Семченко, И. В. Исследование искусственных ДНК-подобных структур в СВЧ-диапазоне: наблюдение поляризационной селективности отражения волн / И. В. Семченко, А. П. Балмаков, С. А. Хахомов // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2009. – № 4. – С. 66 – 72.

27. Семченко, И. В. Оптимальная форма спирали: равенство диэлектрической, магнитной и киральной восприимчивостей / И. В. Семченко, С. А. Хахомов, А. Л. Самофалов // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2009. – Т. 52. – № 5. – С. 30 – 36.

28. Semchenko, I. V. Acoustic waves in ceramics with the electroinduced anisotropy / I. V. Semchenko, S.A. Khakhomov, S. D. Barsukov // Journal of Automation, Mobile Robotics and Intelligent Systems. – 2009. – Vol. 3. – № 4. – P. 199 – 201.

29. Semchenko, I. V. Effect of maximum interaction of circularly polarized electromagnetic waves with the molecule of DNA / I. V. Semchenko, A. P. Balmakov, S. A. Khakhomov // Journal of Automation, Mobile Robotics and Intelligent Systems. – 2009. – Vol. 3. – № 4. – P. 207 – 209.

30. Барсуков, С. Д. Универсальный генератор для акустооптических исследований / С. Д. Барсуков, С. А. Хахомов // Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. – 2009. – № 4(55). – Ч. 2. – С. 88 – 93.

31. Семченко, И. В. Максимальная селективность взаимодействия циркулярно поляризованных электромагнитных волн с молекулой ДНК / И. В. Семченко, А. П. Балмаков, С. А. Хахомов // Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. – 2009. – № 5(56). – Ч. 1. – С. 104 – 108.

32. Барсуков, С. Д. Акустические волны в сегнетокерамике с электроиндуцированной анизотропией / С. Д. Барсуков, С. А. Хахомов, И. В. Семченко // Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. – 2009. – № 5(56). – Ч. 1. – С. 109 – 113.

32. Семченко, И. В. Использование парных спиралей оптимальной формы для создания слабоотражающих покрытий в СВЧ диапазоне / И. В. Семченко, С. А. Хахомов, А. Л. Самофалов // Проблемы физики, математики и техники. – 2009. – № 1. – С. 33 – 39.

34. Семченко, И. В. Взаимодействие искусственных ДНК-подобных структур в СВЧ-диапазоне: поляризационная селективность отражения волн / И. В. Семченко, С. А. Хахомов, А. П. Балмаков // Радиофизика и электроника (Украина, Киев). – 2009. – Т. 14. – № 1. – С. 103 – 108.

35. Semchenko, I. V. Helices of optimal shape for nonreflecting covering / I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov, A. L. Samofalov // The European Physical Journal Applied Physics. – 2010. – Vol. 49. – № 3. – P. 33002-p1 – 33002-p5.

36. Семченко, И. В. Поляризационная селективность взаимодействия молекулы ДНК с рентгеновским излучением / И. В. Семченко, С. А. Хахомов, А. П. Балмаков // Биофизика. – 2010. – Т. 55. – № 2. – С. 227 – 232.

37. Семченко, И. В. Поляризационная селективность искусственных анизотропных структур на основе ДНК подобных спиралей / И. В. Семченко, А. П. Балмаков, С. А. Хахомов // Кристаллография. – 2010. – Т. 55. – № 6. – С. 992 – 998.

38. Исследование свойств искусственных анизотропных структур с большой киральностью / И. В. Семченко, С. А. Хахомов, Е. В. Наумова, В. Я. Принц, С. В. Голод, В. В. Кубарев // Кристаллография. – 2011. – Т. 56. – № 3. – С. 404 – 411.

39. Семченко, И. В. Моделирование и исследование искусственных анизотропных структур с большой киральностью в СВЧ диапазоне / И. В. Семченко, С. А. Хахомов, А. Л. Самофалов // Проблемы физики, математики и техники. – 2011. – № 3(8). – С. 28 – 31.

40. Преимущества искусственных слабо отражающих структур на основе оптимальных спиралей при преломлении и поглощении электромагнитных волн / И. В. Семченко, С. А. Хахомов, А. Л. Самофалов, С. А. Третьяков // Проблемы физики, математики и техники. – 2011. – № 4(9). – С. 1 – 4.

41. Семченко, И. В. Экспериментальные исследования фазовых переходов в сегнетокерамике на основе титаната-бария-стронция / И. В. Семченко, С. А. Хахомов, С. Д. Барсуков // Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. – 2011. – № 6(69). – С. 33–39.

42. Experimental researches of phase transitions in ceramics on the basis of barium-strontium- titanate / I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov, S. D. Barsukov, O. M. Demidenko. – Journal of Advanced Research in Physics. – 2011. – № 2. – P. 021110-1 – 021110-4.

43. Численное моделирование поворота плоскости поляризации при отражении СВЧ волны от двумерной решетки на основе металлических спиралей / И. А. Фаняев, А. Л. Самофалов, И. В. Семченко, С. А. Хахомов // Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. – 2012. – № 6(75). – С. 87 – 93.

44. Microwave circular polarizer based on bifilar helical particles / A. P. Valmakov, I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov, M. Nagatsu // Проблемы физики, математики и техники. – 2013. – № 1(14). – С. 7 – 12.

45. Преобразователи поляризации электромагнитных волн на основе композитных сред со спиральной структурой / А. Л. Самофалов, И. А. Фаняев, И. В. Семченко, С. А. Хахомов // Проблемы физики, математики и техники. – 2013. – № 3(16). – С. 34 – 38.

46. Фаняев, И. А. Дифракция волн на цилиндре, окруженном оптимальными спиралями / И. А. Фаняев, И. В. Семченко, С. А. Хахомов // Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. – 2013. – № 6(81). – С. 208 – 216.

47. Исследование свойств слабоотражающих метаматериалов с компенсированной хиральностью / И. В. Семченко, С. А. Хахомов, В. С. Асадчий, Е. В. Наумова, В. Я. Принц, С. В. Голод, А. Г. Милехин, А. М. Гончаренко, Г. В. Сеницын // Кристаллография. – 2014. – Т. 59. – № 4. – С. 544 – 550.

48. The potential energy of non-resonant optimal bianisotropic particles in an electromagnetic field does not depend on time / I. Semchenko, S. Khakhomov, A. Balmakou, S. Tretyakov. – The European Physical Journal, EPJ Applied Metamaterials. – 2014. – 1. – P.1 – 4.

49. Sihvola, A. H. View on the history of electromagnetics of metamaterials: Evolution of the congress series of complex media / A. H. Sihvola, I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov // Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications. – 2014. – Vol. 12. – № 4. – P. 279 – 283.

50. Экспериментальные исследования направленной антенны на основе спиральных элементов / С. Д. Барсуков, А. П. Балмаков, И. В. Семченко, С. А. Хахомов, Т. А. Державская, А. П. Слобожанюк, А. Е. Краснок, П. А. Белов // Проблемы физики, математики и техники. – 2014. – № 3(20). – С. 16 – 20.

51. Параметрическое моделирование оптимальных омега-элементов, обеспечивающих преобразование поляризации СВЧ волны метаповерхностью / Сонгсонг Цянь, М. А. Подалов, И. В. Семченко, С. А. Хахомов // Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. – 2014. – № 6(87). – С. 215 – 219.

52. Поглотители электромагнитного излучения СВЧ-диапазона на основе полимерных композитов и киральных структур / Сонгсонг Цянь, В. А. Банный, А. Л. Самофалов, И. В. Семченко, С. А. Хахомов // Проблемы физики, математики и техники. – 2014. – № 4(21). – С. 40 – 45.

53. Ground-plane-less bidirectional terahertz absorber based on omega resonators / A. Balmakou, M. Podalov, S. Khakhomov, D. Stavenga, I. Semchenko. – Optics Letters. – 2015. – Vol. 40. – № 9. – P. 2084 – 2087.

54. Total Absorption Based On Smooth Double-Turn Helices / I. A. Faniayeu, I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov, T. Dziarzhauskaya – Advanced Materials Research. – 2015. – Vol. 1117. – № 1. – P. 39 – 43.

55. Semchenko, I.V. Helical Metamaterial Elements As RLC Circuit / I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov, T. Dziarzhauskaya // Advanced Materials Research. – 2015. – Vol. 1117. – № 1. – P. 122 – 125.

56. Одноосный электрически тонкий вращатель поляризации электромагнитных волн / И. А. Фаняев, И. В. Семченко, С. А. Хахомов, А. Л. Самофалов // Проблемы физики, математики и техники. – 2015. – № 1(22). – С. 32 – 37.

57. Подалов, М. А. Создание планарных метаматериалов на основе Ω -элементов с оптимальными параметрами с помощью вакуумно-плазменных технологий / М. А. Подалов, И. В. Семченко, С. А. Хахомов // Проблемы физики, математики и техники. – 2015. – № 2(23). – С. 13 – 17.

58. Broadband Reflectionless Metasheets: Frequency-Selective Transmission and Perfect Absorption / V. S. Asadchy, I. A. Faniayeu, Y. Ra'di, S. A. Khakhomov, I. V. Semchenko, S. A. Tretyakov – Phys. Rev. X. – 2015. – Vol. 5. – No.3. – P. 031005-1 – 031005-10.

59. The equilibrium state of bifilar helix as element of metamaterials / I. V. Semchenko, S.A. Khakhomov, A.L. Samofalov, Qian Songsong – Japanese Journal of Applied Physics Conference Proceedings. – 2016. – Vol. 4. – P. 011112-1–011112-6.

60. Investigation of electromagnetic properties of a high absorptive, weakly reflective metamaterial-substrate system with compensated chirality / I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov, V. S. Asadchy, S. V. Golod, E. V. Naumova, V. Ya. Prinz, A. M. Goncharenko, G. V. Sinitsyn, A. V. Lyakhnovich, V. L. Malevich – Journal of Applied Physics. – 2017. – Vol. 121. – P. 015108-1 – 015108-8.

Материалы конференций

61. Electromagnetic waves in the laminated periodical media with spiral structure: non-collinear propagation / E. A. Fedosenko, I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov, I. N. Akhramenko // Bianasotropics' 97: proceedings of the International Conference and Workshop on Electromagnetics of Complex Media, The University of Glasgow, Great Britain, 5 – 7 June 1997. – The University of Glasgow, Great Britain, 1997. – P. 281 – 284.

62. Semchenko, I. V. Spatial dispersion influence on acoustic waves propagation in crystals with chiral properties induced by the rotating electric field / I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov // Bianasotropics' 97: proceedings of the International Conference and Workshop on Electromagnetics of Complex Media, The University of Glasgow, Great Britain, 5 – 7 June 1997. – The University of Glasgow, Great Britain, 1997. – P. 81 – 84.

63. Khakhomov, S. A. Spatial dispersion influence on acoustic waves transmission and reflection in semiconductors with chiral properties induced by the rotating electric field / S. A. Khakhomov // Bianasotropics' 98: proceedings of the 7th International Conference on Complex Media, Bianasotropics' 98; Technical

University of Braunschweig, Germany, 3 – 6 June 1998. – Braunschweig, Germany, 1998. – P. 141 – 144.

64. Reflection and transmission in uniaxial chiral slabs: the spiral axis along the interfaces / I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov, S. A. Tretyakov, A. H. Sihvola, E. A. Fedosenko : *Bianisotropics' 98: proceedings of the 7th International Conference on Complex Media, Bianisotropics' 98*; Technical University of Braunschweig, Germany, 3 – 6 June 1998. – Braunschweig, Germany, 1998. – P. 225 – 228.

65. Microwave analogy of optical properties of cholesteric liquid crystals / I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov, S. A. Tretyakov, A. H. Sihvola // *Bianisotropics' 98: proceedings of the 7th International Conference on Complex Media, Bianisotropics' 98*; Technical University of Braunschweig, Germany, 3 – 6 June 1998. – Braunschweig, Germany, 1998. – P. 113 – 116.

66. Семченко, И. В. От спиральных антенн в военной и космической технике к преобразователям поляризации электромагнитных волн СВЧ диапазона / И. В. Семченко, С. А. Хахомов, А. И. Самусенко // *Конверсия научных исследований в Беларуси в рамках деятельности МНТЦ: материалы международного семинара, Минск, 17 – 22 мая 1999 г.* – Минск: ИФ НАН Беларуси, 1999. – С. 167 – 170.

67. Influence of local chirality on the Bragg reflection in the multilayer media with spiral structure / I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov, S. A. Tretyakov, A. H. Sihvola // *URSI/IEEE XXIV National Convention on Radio Sciences, proceedings, Turku, Finland, 4 – 5 October 1999.* – Turku, Finland, 1999. – P. 90 – 91.

68. Khakhomov, S. A. Charge-carrier drift influence on the electroacoustic interactions in piezoelectric semiconductors with induced chiral properties / S. A. Khakhomov // *Bianisotropics' 2000: proceedings of the 8th International Conference on Complex Media; Lisbon, Portugal, 27 – 29 September 2000*; ed.: Afonso M. Barbosa and Antonio L. Topa. – Lisbon, Portugal, 2000. – P. 79 – 82.

69. Electromagnetic waves in chiral media with compensated anisotropy / I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov, S. A. Tretyakov, A. H. Sihvola // *Bianisotropics' 2000: proceedings of the 8th International Conference on Complex Media; Lisbon, Portugal, 27 – 29 September 2000*; ed.: Afonso M. Barbosa and Antonio L. Topa. – Lisbon, Portugal, 2000. – P. 197 – 202.

70. Semchenko, I. V. Artificial anisotropic chiral materials for decrease of reflection of electromagnetic waves from metallic surfaces / I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov, E. A. Fedosenko // *Optics of Crystals: proceedings of the International Scientific Conference “Optics of Crystals”, SPIE, Mozyr, Belarus, 2001*; ed.: V.V. Shepelevich, N.N. Egorov. – Mozyr, Belarus, 2001. – Vol. 4358. – P. 309 – 315.

71. Semchenko, I. V. Oblique incidence of electromagnetic waves on artificial anisotropic chiral structures with dielectric and magnetic properties / I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov // 2001 URSI International Symposium on Electromagnetic Theory, proceedings, Victoria, BC, Canada, 13 – 17 May 2001; ed.: M.A. Stuchly, D.G.Shannon. – Victoria, BC, Canada, 2001. – P. 391 – 392.

72. Semchenko, I. V. Artificial anisotropic chiral structures with dielectric and magnetic properties at oblique incidence of electromagnetic waves / I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov // 2001 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference, proceedings, Belem, Brazil, 6 – 10 August 2001. – Belem, Brazil, 2001. – P. 227 – 230.

73. Semchenko, I. V. Problems of Interaction of Radiation with Matter / I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov // Book of Abstracts: ed. I. V. Semchenko and S. A. Khakhomov. – Gomel: Gomel State University, 2001. – 128 p.

74. Семченко, И. В. Исследование поляризации электромагнитного излучения, рассеянного на металлической спирали / И. В. Семченко, С. А. Хахомов, А. Л. Самофалов, В. И. Кондратенко // Лазерная и оптико-электронная техника. – 2002. – Вып. 7. – С. 84 – 91.

75. Semchenko, I. V. Polarization Plane Rotation of Electromagnetic Waves by the Artificial Periodic Structure with One-Turn Helical Elements / I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov, A. L. Samofalov // Bianisotropics' 2004: proceedings of the 10th International Conference on Complex Media and Metamaterials, Het Pand, Chent, Belgium, 22-24 September 2004. – Het Pand, Chent, Belgium, 2004. – P. 74 – 77.

76. Semchenko, I. V. Radiation of Circularly Polarized Electromagnetic Waves by the Artificial Flat Lattice with Two-Turns Helical Elements / I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov, A. L. Samofalov // Bianisotropics' 2004: proceedings of the 10th International Conference on Complex Media and Metamaterials, Het Pand, Chent, Belgium, 22 – 24 September 2004. – Het Pand, Chent, Belgium, 2004. – P. 236 – 239.

77. Семченко, И. В. Эффект Фарадея во вращающемся магнитном поле / И. В. Семченко, С. А. Хахомов // Актуальные проблемы физики твердого тела: сборник докладов международной научной конференции ФТТ-2005, Минск, Беларусь, 26 – 28 октября 2005 г. – Минск, Беларусь: издательский центр БГУ, 2005. – С. 299 – 301.

78. Семченко, И. В. Взаимодействие электромагнитных волн с искусственными киральными объектами / И. В. Семченко, С. А. Хахомов, А. Л. Самофалов // Ковариантные методы в физике. Оптика и акустика : сб. науч. тр. – Минск: ИФ НАН Беларуси, 2005. – С. 55 – 62.

79. Obtaining circularly polarized reflected electromagnetic waves by the artificial flat lattice with one-turn helices / I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov,

A. L. Samofalov, S. A. Tretyakov // *Bianisotropics 2006: proceedings of the International Conference on Complex Media and Metamaterials*. – Samarkand, Uzbekistan, 25 – 28 September 2006. – Helsinki: Helsinki University of Technology, Electromagnetics Laboratory, 2006. – P. 24 – 25.

80. Semchenko, I. V. Polarization selectivity of electromagnetic radiation of DNA / I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov, A. P. Balmakov // *Bianisotropics 2006: proceedings of the International Conference on Complex Media and Metamaterials*. – Samarkand, Uzbekistan, 25 – 28 September 2006. – Helsinki: Helsinki University of Technology, Electromagnetics Laboratory, 2006. – P. 45 – 46.

81. Excitation of circularly polarized UHF wave by the flat periodic structure with Ω -elements / I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov, M. A. Podalov, S. A. Tretyakov // *Bianisotropics 2006: proceedings of the International Conference on Complex Media and Metamaterials*. – Samarkand, Uzbekistan, 25 – 28 September 2006. – Helsinki: Helsinki University of Technology, Electromagnetics Laboratory, 2006. – P. 47 – 48.

82. Semchenko, I. V. Obtaining circularly polarized reflected electromagnetic waves by the artificial flat structure with helical and Ω -elements / I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov // *The 5th International Conference on Global Research and Education, Inter-Academia 2006: proceedings, Iasi, Romania, 25 – 28 September 2006*. – Vol. 1. – Iasi, Romania: Alexandru Ioan Cuza University, 2006. – P. 117 – 122.

83. Semchenko, I. V. Interaction of acoustic waves with rotating electric field in ceramics on the base of barium titanate / I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov, S. D. Barsukov // *The 6th International Conference on Global Research and Education Inter-Academia 2007: proceedings, Hamamatsu, Japan, 26-30 September 2007, Vol. 1*. – Hamamatsu, Japan: Shizuoka University, 2007. – P. 126 – 135.

84. Semchenko, I. V. Electromagnetic model of DNA: observation of polarization selectivity of radiation / I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov, A. P. Balmakov // *The 6th International Conference on Global Research and Education Inter-Academia 2007: proceedings, Hamamatsu, Japan, 26 – 30 September 2007, Vol. 1*. – Hamamatsu, Japan: Shizuoka University, 2007. – P. 136 – 145.

85. Semchenko, I. V. Chiral metamaterial with unit negative refraction index / I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov, S. A. Tretyakov // *1st International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics, Metamaterials 2007: proceedings, Rome, Italy, 22 – 24 October 2007*. – Rome, Italy: University “Roma Tre”, 2007. – P. 218 – 221.

86. Semchenko, I. V. Electromagnetic model of DNA: observation of polarization selectivity of radiation / I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov,

A. P. Balmakov // 1st International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics, Metamaterials 2007: proceedings, Rome, Italy, 22 – 24 October 2007. – Rome, Italy: University “Roma Tre”, 2007. – P. 711 – 714.

87. Electromagnetic cloaking with a mixture of spiral inclusions / M. Asghar, I. Hakala, J. Jantunen, H. Kettunen, M. Pitkonen, J. Qi, G. Statkute, A. Varpula, I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov, R. Gonzalo, E. Ozbay, V. Podlozny, A. Sihvola, S. Tretyakov, H. Wallen: 1st International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics, Metamaterials 2007: proceedings, Rome, Italy, 22 – 24 October 2007. – Rome, Italy: University “Roma Tre”, 2007. – P. 957 – 960.

88. Semchenko, I. V. Optimal Shape of Spiral: Equality of Dielectric, Magnetic and Chiral Properties / I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov, A. L. Samofalov // META'08, Metamaterials for Secure Information and Communication Technologies: proceedings, Marrakesh, Morocco, 7 – 10 May 2008. – Paris, France: University Paris Sud, 2008. – P. 71 – 80.

89. Semchenko, I. V. Realistic Spirals of Optimal Shape for Electromagnetic Cloaking / I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov, A. L. Samofalov // 2nd International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics, Metamaterials 2008: proceedings, Pamplona, Spain, 21 – 26 September 2008. – Pamplona, Spain: Universidad Publico de Navarra, 2008. – P. 1 – 3.

90. Semchenko, I. V. The universal generator for acousto-optic researches / I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov, S. D. Barsukov // The 7th International Conference on Global Research and Education Inter-Academia 2008: proceedings, Pecs, Hungary, 15 – 18 September 2008. – Pecs, Hungary: Budapest University of Technology and Economics, 2008. – P. 438 – 443.

91. Optimal Shape of Spiral: Energy Approach / I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov, A. L. Samofalov, A. P. Balmakov // The 7th International Conference on Global Research and Education Inter-Academia 2008: proceedings, Pecs, Hungary, 15 – 18 September 2008. – Pecs, Hungary: Budapest University of Technology and Economics, 2008. – P. 444 – 449.

92. Семченко, И. В. Поляризационная селективность взаимодействия молекулы дезоксирибонуклеиновой кислоты с «мягким» рентгеновским и ультрафиолетовым излучением / И. В. Семченко, С. А. Хахомов, А. П. Балмаков // II Конгресс физиков Беларуси: сб. науч. тр., Минск, Беларусь, 3 – 5 ноября 2008 г. / – Минск, Беларусь: НАН Беларуси, 2008. – С. 126 – 127.

93. Semchenko, I. V. Cube Composed of DNA-like Helices Displays Polarization Selectivity Properties in Microwave / I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov, A. P. Balmakov // 3rd International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics, Metamaterials 2009:

proceedings, London, Great Britain, 30 August – 4 September 2009. – London, Great Britain: Queen Mary University of London, 2009. – P. 271 –273.

94. Semchenko, I. V. 3D DNA-like Crystals Microwave Analogy for Studying Polarization Selectivity Properties / I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov, A. P. Balmakov // Fourth International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics 2010: proceedings, Karlsruhe, Germany, 13 – 18 September 2010. – Karlsruhe, Germany: Karlsruhe Institute of Technology, 2010. – P. 848 – 850.

95. Semchenko, I. V. Electrodynamics of DNA and artificial DNA-like structures / I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov, A. P. Balmakov // International Conference «Optical Techniques and Nano-Tools for Material and Life Sciences» (OTN4MLS-2010): Minsk, Belarus, June 15 – 19 2010. – Minsk, Belarus, 2010. – P. 215 – 225.

96. Семченко, И. В. Исследование сильных киральных свойств искусственных анизотропных структур в СВЧ диапазоне / И. В. Семченко, С. А. Хахомов, А. Л. Самофалов // Гомельский научный семинар по теоретической физике: материалы научного семинара по теоретической физике, посвященного 100-летию со дня рождения Ф. И. Федорова, Гомель, 20 – 22 июня 2011 г. / ГГУ им. Ф. Скорины; редкол.: А. В. Рогачев [и др.]. – Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2011. – С. 27 – 31.

97. Семченко, И. В. Моделирование электромагнитных свойств одновитковой спирали с оптимальными параметрами, обеспечивающими излучение циркулярно поляризованной волны / И. В. Семченко, С. А. Хахомов, И. А. Фаняев // Гомельский научный семинар по теоретической физике: материалы научного семинара по теоретической физике, посвященного 100-летию со дня рождения Ф. И. Федорова, Гомель, 20–22 июня 2011 г. / ГГУ им. Ф. Скорины; редкол.: А. В. Рогачев [и др.]. – Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2011. – С. 31 – 35.

98. Strong chiral properties of helically-structured metamaterials in THz range / I. V. Semchenko [et al.]: 5th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics: proceedings, Barcelona, Spain, 10 – 15 October 2011. – Barcelona, Spain: Universitat Autònoma de Barcelona, 2011. – P. 36 – 38.

99. Сильные киральные свойства метаматериалов, созданных на основе спиральных элементов, в терагерцовом диапазоне / И. В. Семченко, С. А. Хахомов, Е. В. Наумова, В. Я. Принц, С. В. Голод, В. В. Кубарев // III международная научная конференция «Проблемы взаимодействия излучения с веществом», Гомель, Беларусь, 9 – 11 ноября 2011 г.: материалы конф. / Гом. гос. ун-т, редкол.: А. В. Рогачев (гл. ред.) [и др.]. – Гомель: ГГУ, 2011. – Ч. 1. – С. 71 – 76.

100. Registration of transverse acoustic waves in crystals in the rotating electric field / I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov, S. D. Barsukov, O. M. Demidenko // The 11th International Conference on Global Research and Education, in Engineers for Better Life, Inter-Academia 2012 : proceedings, Budapest, Hungary, 27 – 30 August 2012. – Budapest, Hungary: Obuda University, 2012. – P. 443 – 445.

101. Advantages of metamaterials based on double-stranded DNA-like helices / I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov, A. P. Balmakov, M. Nagatsu // 6th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics Metamaterials 2012: proceedings, St. Petersburg, Russia, 17 – 22 September 2012. – St. Petersburg, Russia: St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2012. – P. 309 – 311.

102. Calculation and analysis of the tensors of electric, magnetic and chiral susceptibilities of the helices with optimal shape / V. Asadchy, I. Faniayeu, I. Semchenko, S. Khakhomov // 6th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics Metamaterials 2012: proceedings, St. Petersburg, Russia, 17 – 22 September 2012. – St. Petersburg, Russia: St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2012. – P. 324 – 326.

103. 2D isotropic metamaterial with equal permittivity and permeability in THz range / I. Semchenko, S. Khakhomov, V. Prinz, E. Naumova, S. Golod, A. Buldygin, V. Seyfi: 6th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics Metamaterials 2012 : proceedings, St. Petersburg, Russia, 17 – 22 September 2012. – St. Petersburg, Russia: St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2012. – P. 571 – 573.

104. Nonlinear-transformation based cylindrical cloaks and their practical advantages / V. Asadchy, I. Faniayeu, I. Semchenko, S. Khakhomov // 6th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics Metamaterials 2012: proceedings, St. Petersburg, Russia, 17 – 22 September 2012. – St. Petersburg, Russia: St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2012. – P. 146 – 148.

105. Optimal Arrangement of Smooth Helices in Uniaxial 2D-Arrays / V. Asadchy, I. Faniayeu, Y. Ra'di, I. Semchenko, S. Khakhomov // 7th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics, Metamaterials 2013: proceedings, Bordeaux, France, 16th-21st September 2013. – IEEE, New York, 2013. – P. 244 – 246.

106. The potential energy of non-resonant reciprocal optimal bianisotropic particles does not depend on time / I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov, A. P. Balmakov, S. Tretyakov // 8th International Congress on

Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics “Metamaterials 2014”: proceedings, Copenhagen, Denmark, 25 – 30 August 2014. – Copenhagen, Denmark: Technical University of Denmark, 2014. – 3 p.

107. Single-Layer Meta-Atom Absorber / I. Faniayeu, V. Asadchy, T. Dzerzhanskaya, I. Semchenko, S. Khakhomov: 8th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics “Metamaterials 2014”: proceedings, Copenhagen, Denmark, 25 – 30 August 2014. – Copenhagen, Denmark: Technical University of Denmark, 2014. – 3 p.

108. Faniayeu, I. Total absorption based on smooth double-turn helices / I. Faniayeu, I. Semchenko, S. Khakhomov // The 13th International Conference on Global Research and Education, Inter-Academia 2014: proceedings, Riga, Latvia, 10 – 12 September 2014. – Riga, Latvia: Riga Technical University, 2014. – P. 229–230.

109. Dzerzhanskaya, T. Helical metamaterial elements as RLC circuit / T. Dzerzhanskaya, I. Semchenko, S. Khakhomov // The 13th International Conference on Global Research and Education, Inter-Academia 2014: proceedings, Riga, Latvia, 10 – 12 September 2014. – Riga, Latvia: Riga Technical University, 2014. – P. 226 – 228.

110. Разработка киральных метаматериалов для создания плоской «линзы» в терагерцовом диапазоне на основе спиральных элементов оптимальной формы / И. В. Семченко, С. А. Хахомов, А. Л. Самофалов, Е. В. Наумова, В. Я. Принц, С. В. Голод // Научный семинар по оптике и теоретической физике, Гомель, Беларусь, 21 мая 2014: материалы семинара / Гом. гос. ун-т, редкол.: А. В. Рогачев (гл. ред.) [и др.]. – Гомель: ГГУ, 2014. – С. 46 – 51.

111. Поглощение нормально падающей плоской электромагнитной волны в тонком слое метаматериала на основе одновитковых оптимальных спиралей / И. А. Фаняев, Т. А. Державская, И. В. Семченко, С. А. Хахомов, В. С. Асадчий // Научный семинар по оптике и теоретической физике, Гомель, Беларусь, 21 мая 2014: материалы семинара / Гом. гос. ун-т, редкол.: А. В. Рогачев (гл. ред.) [и др.]. – Гомель: ГГУ, 2014. – С. 73 – 77.

112. Поглотители электромагнитного излучения СВЧ-диапазона на основе полимерных композитов и энантиоморфных структур / В. А. Банний, А.Л. Самофалов, И. В. Семченко, С. А. Хахомов // Научный семинар по оптике и теоретической физике, Гомель, Беларусь, 21 мая 2014: материалы семинара / Гом. гос. ун-т, редкол.: А. В. Рогачев (гл. ред.) [и др.]. – Гомель: ГГУ, 2014. – С. 196 – 201.

113. Broadband infrared quarter wave plate realization in a 3D array / A. Balmakou, I. Semchenko, S. Khakhomov, M. Nagatsu, V. Mizeikis, V. Asadchy // International Scientific Conference “Optics of Crystals”: proceedings, Mozyr, Belarus, 23 – 26 September 2014. – Mozyr, Belarus, 2014. – P. 65 – 66.

114. Wave transformations in thin metamaterial layers / I. Faniayeu, V. Asadchy, I. Semchenko, S. Khakhomov // International Scientific Conference “Optics of Crystals”: proceedings, Mozyr, Belarus, 23 – 26 September 2014. – Mozyr, Belarus: I. P. Shamyakin Mozyr State Pedagogical University, 2014. – P. 115 – 116.

115. DNA-Type Helix With Optimal Shape In Soft X-Ray Range / I. Faniayeu, I. Semchenko, S. Khakhomov, A. Balmakov // 9th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics, Metamaterials 2015: proceedings, Oxford, Great Britain, 7 – 12 September 2015. – Oxford, Great Britain, 2015. – P. 621 – 623.

116. The equilibrium state of bifilar helix as element of metamaterials / I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov, A. L. Samofalov, Songsong Qian // 14th International Conference on Global Research and Education, Inter-Academia 2015: proceedings, Hamamatsu, Japan, 28 – 30 September 2015. – Hamamatsu, Japan: Shizuoka University, 2015. – P. 124 – 125.

117. Semchenko, I. V. Phonon crystals with the structure induced by the variable electric field / I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov, S. D. Barsukov // 14th International Conference on Global Research and Education, Inter-Academia 2015: proceedings, Hamamatsu, Japan, 28 – 30 September 2015. – Hamamatsu, Japan: Shizuoka University, 2015. – P. 116 – 117.

118. Experimental research of features of matched bifilar helical antenna with optimal parameters / I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov, S. D. Barsukov, A. S. Pobiyakha // 14th International Conference on Global Research and Education, Inter-Academia 2015: proceedings, Hamamatsu, Japan, 28 – 30 September 2015. – Hamamatsu, Japan, 2015. – P. 114 – 115.

119. Electromagnetic field energy in absorptive chiral metamaterial with helical elements / I. V. Semchenko, A. P. Balmakov, S. A. Khakhomov, S.A. Tretyakov // 10th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics, Metamaterials 2016: proceedings, Crete, Greece, 17 – 22 September 2016. – Chania, Crete, Greece, 2016. – P. 221 – 223.

Прочие публикации

120. Electromagnetic waves in anisotropic chiral non-reciprocal media with uniaxial symmetry. Exact solution of boundary-value problem / I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov, S. A. Tretyakov, A. H. Sihvola, E. A. Fedosenko. – Helsinki: Helsinki University of Technology, Electromagnetics Laboratory, 1998. – 18 p. – (Report 261/ Helsinki University of Technology).

121. Microwave analogy of optical properties of cholesteric liquid crystals with local chirality / I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov, S. A. Tretyakov, A. H. Sihvola. – Helsinki: Helsinki University of Technology, Electromagnetics Laboratory, 1999. – 11 p. – (Report 298 / Helsinki University of Technology).

122. Semchenko, I. V. Effect of charge-carrier drift on the electroacoustic interactions in piezoelectric semiconductors with induced chiral properties / I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov. – Helsinki: Helsinki University of Technology, Electromagnetics Laboratory, 1999. – 14 p. – (Report 311/ Helsinki University of Technology).

123. Electromagnetic waves in artificial biaxial chiral structures with dielectric and magnetic properties / I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov, S. A. Tretyakov, A. H. Sihvola. – Helsinki: Helsinki University of Technology, Electromagnetics Laboratory, 1999. – 17 p. – (Report 313 / Helsinki University of Technology).

Патенты

124. Способ и устройство для поворота плоскости поляризации ультразвуковой волны: пат. 2123895 Рос. Федерация: / И. В. Семченко, А. Н. Сердюков, С. А. Хахомов; заявитель и патентообладатель УО «Гомельский гос. ун-т. им. Ф. Скорины». – № 2123895; заявл. 27.07.1994; опубл. 27.12.1998 // Официальный бюл. «Изобретения (заявки и патенты)» (с полным описанием изобретений к патентам)». – 1998. – № 36. – С. 306-307.

125. Способ и устройство для усиления ультразвуковой волны: пат. 9476 Респ. Беларусь: МПК (2006) В 06В 1/06, G 01В 17/00, G 01N 29/00 / И. В. Семченко, С. А. Хахомов; заявитель и патентообладатель УО «Гомельский гос. ун-т. им. Ф. Скорины». – №а20040700; заявл. 30.06.2007; опубл. 27.12.2007 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2007. – № 3. – С. 70 – 71.

126. Способ и устройство для преобразования ультразвуковой волны: пат. 2288785 Рос. Федерация: / И. В. Семченко, С. А. Хахомов; заявитель и патентообладатель УО «Гомельский гос. ун-т. им. Ф. Скорины». – № 2288785; заявл. 22.02.2005; опубл. 10.12.2006 // Официальный бюл. «Изобретения. Полезные модели (с полным описанием изобретений к патентам)». – 2006. – № 34.

127. Устройство для преобразования поляризации: пат. 9850 Респ. Беларусь: МПК (2006) Н 01 Q 15/00, Н 01 Q 21/24 / И. В. Семченко, С. А. Хахомов, А. Л. Самофалов; заявитель и патентообладатель УО «Гомельский гос. ун-т. им. Ф. Скорины». – № а 20050738; заявл. 18.07.2005; опубл. 30.04.2007 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2007. – № 5. – С. 146–147.

128. Устройство для преобразования поляризации электромагнитной волны: пат. 2316857 Рос. Федерация: МПК7 Н 01 Q 15/24, Н 01 Q 21/06 / И. В. Семченко, С. А. Хахомов, А. Л. Самофалов; заявитель и патентообладатель УО «Гомельский гос. ун-т. им. Ф. Скорины». – № 2006112520/09; заявл. 14.04.2006; опубл. 10.02.2008 // Официальный бюл. «Изобретения. Полезные модели (с полным описанием изобретений к патентам)». – 2008. – № 4.

РЕЗЮМЕ**Хахомов Сергей Анатольевич****Волновые процессы в метаматериалах и спирально-структурированных системах**

Ключевые слова: метаматериал, спиральный элемент, киральность, поляризация, электрический дипольный момент, магнитный момент, электромагнитная волна.

Цель работы: теоретическое и экспериментальное исследование свойств метаматериалов и спирально-структурированных систем, выявление для них условий преобразования поляризации электромагнитных и акустических волн и подавления отраженной волны при поглощении прошедшей волны, а также обоснование возможностей практического применения физических свойств и явлений, характерных для указанного класса сред.

Методы исследования: аналитический расчёт характеристик электромагнитного поля на основе теории дипольного излучения электромагнитных волн, энергетического подхода, а также спиральной модели молекул кирального вещества; при проведении моделирования использован метод конечных элементов; для экспериментальных исследований применена методика измерения поляризационной характеристики электромагнитной волны, основанная на использовании приемной антенны с линейной поляризацией поля.

Полученные результаты и их новизна: разработаны теоретические основы проектирования метаматериалов и спирально-структурированных систем на основе спиральных элементов с оптимальными параметрами, преобразователей поляризации электромагнитных волн на основе композитных сред со спиральной структурой, обеспечивающих трансформацию линейно поляризованной волны в циркулярно поляризованную. Проведено моделирование и экспериментальное подтверждение полученных результатов.

Рекомендации по использованию и область применения. Результаты работы могут быть использованы при расчётах и создании слабо отражающих поглощающих экранов на основе спирально-структурированных метаматериалов, при создании частотных и поляризационно-селективных фильтров и преобразователей поляризации в СВЧ и дальнем ИК диапазонах. Полученные результаты внедрены в учебный и научный процесс в Гомельском государственном университете имени Франциска Скорины. Область применения – оптика, радиофизика, биофизика.

РЭЗІЮМЭ**Хахомаў Сяргей Анатольевіч****Хвалевыя працэсы ў метаматэрыялах і спіральна-структураваных сістэмах**

Ключавыя словы: метаматэрыял, спіральны элемент, кіральнасць, палярызацыя, электрычны дыпольны момант, магнітны момант, электрамагнітная хваля.

Мэта даследавання: тэарэтычнае і эксперыментальнае даследаванне уласцівасцяў метаматэрыялаў і спіральна-структураваных сістэм, выяўленне для іх умоў пераўтварэння палярызацыі электрамагнітных і акустычных хваль і падаўлення адлюстраванай хвалі пры паглыннанні хвалі якая прайшла, а таксама абгрунтаванне магчымасцяў практычнага прымянення фізічных уласцівасцяў і з'яў, характэрных для названага класа асяроддзяў.

Метады даследавання: аналітычны разлік характарыстык электрамагнітнага поля на аснове тэорыі дыпольнага выпраменьвання электрамагнітных хваляў, энергетычнага падыходу, а таксама спіральнай мадэлі малекул кіральнага рэчывы; пры правядзенні мадэлявання выкарыстаны метады канечных элементаў; для эксперыментальных даследаванняў прыменена метадыка вымярэння палярызацыйнай характарыстыкі электрамагнітнай хвалі, заснаваная на выкарыстанні прыёмнай антэны з лінейнай палярызацыяй поля.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: распрацаваны тэарэтычныя асновы праектавання метаматэрыялаў і спіральна-структураваных сістэм на аснове спіральных элементаў з аптымальнымі параметрамі, пераўтваральнікаў палярызацыі электрамагнітных хваль на аснове кампазітных асяроддзяў са спіральнай структурай, якія забяспечваюць трансфармацыю лінейна палярызаванай хвалі ў цыркулярна палярызаваную. Праведзена мадэляванне і эксперыментальнае пацверджанне атрыманых вынікаў.

Рэкамендацыі па выкарыстанні і вобласць прымянення. Вынікі работы могуць быць выкарыстаны пры разліках і стварэнні слаба адлюстроўваючых паглынальных экранаў на аснове спіральна-структураваных метаматэрыялаў, пры стварэнні частотных і палярызацыйна-селектыўных фільтраў і пераўтваральнікаў палярызацыі ў ЗВЧ і далёкім ІЧ дыяпазонах. Атрыманыя вынікі ўкаранёны ў навучальны і навуковы працэс у Гомельскім дзяржаўным універсітэце імя Францыска Скарыны. Вобласць прымянення - оптыка, радыёфізіка, біяфізіка.

SUMMARY**Khakhomov Sergei Anatolyevich****Wave processes in metamaterials and helix-structured systems**

Key words: metamaterial, helical element, chirality, polarization, electric dipole moment, magnetic moment, electromagnetic wave.

Aim of the work: theoretical and experimental study of the properties of metamaterials and helix-structured systems, the identification of conditions for polarization conversion of electromagnetic and acoustic waves in such systems and suppression of the reflected wave with absorption of the transmitted wave, as well as the rationale for possibilities of practical application of physical properties and the phenomena which are characteristic to this class of media.

The methods of research: analytical calculations of electromagnetic field characteristics on the basis of the theory of dipole radiation of electromagnetic waves, energy approach, as well as the helical model of molecules of chiral substances; the finite element methods were used for the simulations; measurement techniques for identification of polarization characteristics of electromagnetic waves were used during experimental studies utilizing of the receiving antenna of linear polarization.

Obtained results and their novelty: the theoretical basis for designing of metamaterials and helix-structured systems based on the helical elements with optimal parameters was developed; converters polarization of electromagnetic waves based on composite media with helical structure were designed to ensure the transformation of a linearly polarized wave to a circularly polarized. The simulation and experimental verification of the results were carried out.

Recommendation for future use and application fields. The results can be used for analytical calculations related to designing of reflectionless absorbing screens on the basis of helix-structured metamaterials as well as polarization-selective filters and converters of polarization in microwave and far-IR ranges. The results were implemented in the educational and scientific processes at Francisk Skorina Gomel State University. The fields of applicability: optics, microwaves, biophysics.

ХАХОМОВ
Сергей Анатольевич

**ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В МЕТАМАТЕРИАЛАХ И
СПИРАЛЬНО-СТРУКТУРИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук
по специальности 01.04.05 – оптика



Подписано в печать 09.10.2017. Формат 60×84 1/16.
Бумага офсетная. Ризография. Усл. печ. л. 3,0.
Уч.-изд. л. 3,3. Тираж 80 экз. Заказ 746.

Издатель и полиграфическое исполнение:
учреждение образования
«Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 1/87 от 18.11.2013.
Специальное разрешение (лицензия) № 02330 / 450 от 18.12.2013.
Ул. Советская, 104, 246019, Гомель