

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 621.396: 537.862

**САМОФАЛОВ
АНДРЕЙ ЛЕОНИДОВИЧ**

**ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН СВЧ
ДИАПАЗОНА В ИСКУССТВЕННЫХ КИРАЛЬНЫХ СРЕДАХ**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.03 – радиофизика

Минск, 2013

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

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

Официальные оппоненты: **Симончик Леонид Васильевич**,
доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий лабораторией физики газового разряда
государственного учреждения образования
«Институт физики имени Б.И. Степанова
Национальной академии наук Беларуси»;

Максименко Сергей Афанасьевич,
доктор физико-математических наук, доцент,
директор НИУ «Институт ядерных проблем»
Белорусского государственного университета.

Оппонирующая организация – **Учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».**

Защита состоится **07 июня 2013 года в 10-00** часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.01.10 при Белорусском государственном университете по адресу: 220030, Минск, ул. Ленинградская, 8 (корпус юридического факультета БГУ), ауд. 407; тел. ученого секретаря: 209 57 09.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке Белорусского государственного университета.

Автореферат разослан «___» _____ мая 2013 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций
кандидат технических наук

А.Ф. Романов

КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Современная электродинамика требует исследования и разработки новых типов искусственных сред, так называемых метаматериалов, обладающих особыми свойствами, которые невозможно получить, используя природные вещества. В качестве характерных свойств метаматериалов принято рассматривать: отрицательные значения электрической и магнитной проницаемости; отрицательный коэффициент преломления; сильные киральные свойства и др.

В данной работе в качестве элементов искусственных структур выбраны спирали, поскольку они характеризуются одновременно диэлектрическими и магнитными восприимчивостями. Сочетание диэлектрических и магнитных свойств и более того, их равенство, является необходимым условием максимального проявления киральных свойств.

В работе проведена разработка теоретических основ преобразователей поляризации электромагнитных волн, на основе искусственных сред состоящих из киральных объектов в виде цилиндрических спиралей, с целью трансформации падающей линейно поляризованной волны в циркулярно поляризованную. Показана возможность вращения плоскости поляризации отраженной электромагнитной волны при взаимодействии с плоской двумерной решеткой, состоящей из упорядоченных спиральных элементов.

Полученные результаты могут быть использованы для преобразования поляризации электромагнитных волн, например, получения циркулярно поляризованной волны, вращения главной оси эллипса поляризации, а также для создания слабо отражающих покрытий. Рассматривается возможность использования таких структур для реализации волнового обтекания цилиндрических объектов в СВЧ диапазоне.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами

Работа выполнена на кафедре общей физики физического факультета УО «Гомельский государственный университет имени Ф. Скорины». Выбор темы диссертационной работы был сделан с учетом необходимости исследования и разработки новых типов искусственных материалов, обладающих особыми свойствами, которые невозможно получить, используя 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).

Диссертационная работа подготовлена на основе результатов исследований, проведенных в ходе работ по следующим научным программам и темам:

- задание Министерства образования РБ «Распространение и преобразование электромагнитных волн в искусственных композитных средах со спиральной и омега-структурой» (2000 – 2001, № ГР 2000638);
- задание Государственной программы фундаментальных исследований «Микроволны» «Электродинамика искусственных композитных спиральных и омега-структур в микроволновом диапазоне» (2001 – 2005, № ГР 20011320);
- задание Министерства образования РБ «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).

Цель и задачи исследования

Целью работы является исследование свойств искусственных двумерных решеток, состоящих из металлических спиралей с предварительно рассчитанными параметрами, и демонстрация их потенциального применения. В частности, они могут использоваться для преобразования поляризации электромагнитных волн СВЧ диапазона, например, получения циркулярно

поляризованной волны, вращения главной оси эллипса поляризации, а также для создания слабо отражающих покрытий.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- определить параметры спиральных элементов, при которых искусственная среда проявляет сильные киральные свойства;
- провести аналитическое моделирование частотной зависимости параметра киральности искусственной среды;
- провести расчёт электрического дипольного и магнитного моментов, возникающих в спирали под действием падающей электромагнитной волны с учетом возможного распределения тока в спирали;
- определить параметры спиральных элементов, при которых возможно излучение циркулярно поляризованной волны;
- провести теоретический расчет и оптимизацию расположения микровключений в матрице для создания слабо отражающих структур;
- провести моделирование характеристик электромагнитного излучения рассеянного на отдельной металлической спирали и на искусственных образцах, состоящих из таких спиралей;
- разработать методику изготовления металлических спиральных элементов и образцов искусственных сред, состоящих из таких элементов;
- изготовить образцы искусственных сред, состоящих из металлических спиралей, и провести с ними экспериментальные исследования.

Объектом исследования диссертации являются искусственные плоские двумерные решетки, состоящие из киральных объектов в виде цилиндрических спиралей.

Предметом исследования диссертации являются характеристики электромагнитного излучения, рассеянного на искусственных плоских двумерных решетках, состоящих из киральных объектов в виде цилиндрических спиралей: угол поворота плоскости поляризации, коэффициент эллиптичности прошедшей и отраженной волны, коэффициент отражения и прохождения.

Положения, выносимые на защиту

1. Искусственные анизотропные плоские киральные структуры, состоящие из одного слоя одновитковых спиральных элементов с углом подъема, равным $35^\circ \pm 3^\circ$ или $53^\circ \pm 3^\circ$, поворачивают плоскость поляризации отраженной волны на угол $20^\circ \pm 3^\circ$ на частоте, соответствующей полуволновому

резонансу спирали, независимо от ориентации плоскости поляризации падающей волны относительно оси спиралей.

2. В спиралях с параметрами, обеспечивающими индуцирование линейно поляризованной электромагнитной волной СВЧ диапазона эквивалентных электрического дипольного и магнитного моментов (удовлетворяющих условию $p=m/c$), а также анизотропных двумерных решетках, образованных такими спиралями, отраженная волна преобразуется в циркулярно поляризованную независимо от распределения тока в спирали и ориентации плоскости поляризации падающей волны относительно оси спиралей.

3. Электромагнитная волна, отраженная от искусственной анизотропной киральной структуры на основе одновитковых спиральных элементов с параметрами, обеспечивающими наведение эквивалентных электрического дипольного и магнитного моментов (удовлетворяющих условию $p=m/c$), является циркулярно поляризованной, если её волновой вектор ортогонален плоскости, проходящей через концы и ось спиральных элементов.

Личный вклад соискателя

Представленные в диссертации положения и основные результаты получены лично соискателем под руководством доктора физико-математических наук, профессора Семченко И. В. Автор принимал непосредственное участие в постановке и планировании задач исследования, проведении теоретических расчетов, им разработана методика изготовления экспериментальных образцов двумерных периодических решеток на основе спиральных элементов и лично изготовлены все опытные образцы. Автором проведены все экспериментальные исследования, он также принимал участие 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 и С.А. Хахомовым, соавторами даны полезные рекомендации при обсуждении и интерпретации полученных результатов.

Апробация результатов диссертации

Результаты работы доложены и обсуждены на следующих конференциях:

- IX Республиканской научной конференции магистрантов и аспирантов «Физика конденсированных сред» (Гродно, 2001);

- X Республиканской научной конференции магистрантов и аспирантов «Физика конденсированных сред» (Гродно, 2002);
- IV Международной научно-технической конференции (Минск, 2002);
- Третьей международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика-2003» (С.-Петербург, 2003);
- 10th Conference on Complex Media and Metamaterials «Bianisotropics 2004» (Ghent – Belgium, 2004);
- Юбилейной научно-практической конференции, посвященной 75-летию со дня основания Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины (Гомель, 2005);
- II международной научной конференции «Проблемы взаимодействия излучения с веществом» (Гомель, 2006);
- Conference on Complex Media and Metamaterials «Bianisotropics 2006» (Самарканд, 2006);
- 7th International Conference on Global Research and Education Inter-Academia 2008 (Hungary, 2008);
- Metamaterials for Secure Information and Communication Technologies «META'08» (Marrakesh – Morocco, 2008);
- Metamaterials 2008 (Pamplona–Spain, 2008);
- Гомельском научном семинаре по теоретической физике, посвященном 100-летию со дня рождения Ф.И. Федорова (Гомель, 20 – 22 июня 2011);
- III Конгрессе физиков Беларуси, симпозиуме, посвященном 100-летию со дня рождения академика Ф.И. Федорова (Минск, 25 – 27 сентября 2011);
- III Международной научной конференции «Проблемы взаимодействия излучения с веществом», посвященной 85-летию со дня рождения Б. В. Бокутя (Гомель, 9 – 11 ноября 2011).

Результаты работы доложены также на научных семинарах физического факультета и кафедры общей физики УО «Гомельский государственный университет имени Ф. Скорины» (2003 – 2012 гг.).

Опубликованность результатов

Результаты диссертации опубликованы в 26 научных работах, в том числе: 10 статей в научных журналах, из которых 9 – в соответствии с пунктом 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь (общим объемом 4,1 авторского листа); 3 статьи в сборниках научных трудов; 7 статей в сборниках материалов научных конференций и 6 тезисов. По результатам диссертации получено 2 патента на изобретение.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения и библиографического списка. Полный объем диссертации составляет 122 страницы. Работа содержит 2 таблицы на 1 странице, 68 рисунков на 27 страницах, список использованных источников из 138 наименований (включая собственные публикации соискателя) на 13 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

В первой главе представлен обзор литературы по теме исследования. Приведены примеры различных моделей киральных элементов, рассматриваемых в современной литературе: цилиндры с проводимостью вдоль винтовых линий поверхности, разомкнутые кольца с прямолинейными концами, сферы со спиральной проводимостью, цилиндрические металлические спирали. Рассматриваются также модели элементов, обладающих магнитоэлектрическими свойствами, но не киральных: двумерные частицы в виде греческой буквы Ω (омега-элемент), полосковый элемент в виде буквы S.

Показана возможность использования киральных сред для создания слабо отражающих экранов на основе одно- и многослойных киральных структур, создания поглощающих покрытий на основе однородных киральных структур, весьма перспективной является также возможность использования киральной среды в качестве заполнителей волноведущих структур СВЧ, что может привести к расширению функциональных возможностей устройств СВЧ. Искусственные киральные среды могут быть использованы при создании частотных и поляризационно-селективных СВЧ фильтров и преобразователей поляризации. Рассмотрена возможность использования киральных элементов для создания среды с одновременно отрицательными диэлектрической и магнитной проницаемостями, а также для электромагнитной маскировки материальных тел методом волнового обтекания. Указано на отличительные особенности исследований, проведенных в данной работе, от ранее известных. Дано обоснование выбора объекта исследования.

Во второй главе описано оборудование, использованное в экспериментальных исследованиях. Изложена методика измерения поляризационной характеристики электромагнитной волны, рассеянной на двумерной решётке, основанная на использовании приемной антенны с линейной поляризацией поля (рупорная антенна). Приведена методика

изготовления экспериментальных образцов двумерных периодических решеток на основе спиральных элементов и схема проведения эксперимента. Кратко описана методика статистической обработки результатов исследований.

В третьей главе основываясь на модели молекулярной оптической активности, с учетом аналогии между спиралевидной молекулой и металлической спиралью, проведен расчет оптимальных параметров спиральных элементов с целью поворота плоскости поляризации СВЧ волны при её взаимодействии с искусственной структурой. Показано, что максимальное значение удельной вращательной способности соответствует углу подъема спирали $35^{\circ}16'$ и может быть достигнуто при числе витков спирали, равном единице.

Проведено компьютерное моделирование методом конечных элементов поворота плоскости поляризации СВЧ волны, отраженной от одиночной металлической спирали с углом подъема 35° и решетки, состоящей из таких спиралей. Сравнение результата моделирования позволяет сделать вывод, что вблизи резонансной частоты разность значений угла поворота плоскости поляризации для решетки и одиночной спирали не превышает 10 %.

Моделирование также показало, что угол поворота плоскости поляризации вблизи резонансной частоты не зависит от периода решетки. Следовательно, взаимное влияние спиралей в решетке несущественно изменяет поворот плоскости поляризации отраженной волны.

Для подтверждения теоретических расчетов изготовлены два образца двумерной решетки, состоящих из одновитковых металлических (медных) спиральных элементов. Количество спиралей в образцах, толщина и длина проволоки, из которой изготовлены спирали, в обоих случаях одинаковы, при этом спирали с углом подъема 35° являются левосторонними, а спирали с углом подъема 53° – правосторонними.

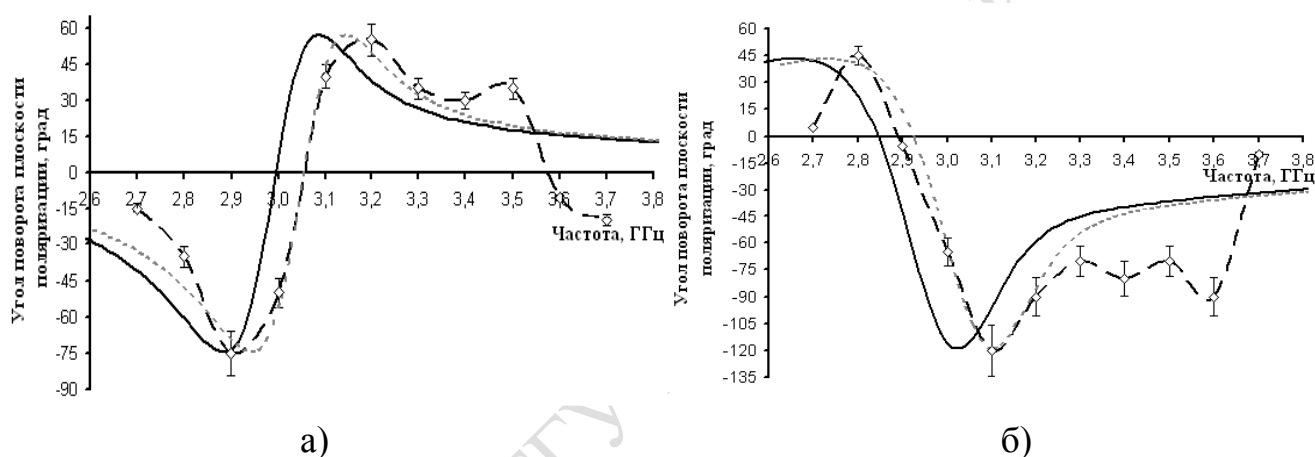
Приведены графики экспериментальных исследований частотной зависимости угла поворота плоскости поляризации электромагнитной волны, отраженной от двумерной решетки, состоящей из одновитковых спиральных элементов с углами подъема $35^{\circ}\pm 3^{\circ}$ и $53^{\circ}\pm 3^{\circ}$. Показано, что при взаимодействии падающей линейно поляризованной волны с данными образцами наблюдается поворот плоскости поляризации отраженной волны на всем исследуемом частотном диапазоне (2,7 - 3,7 ГГц). Сравнение экспериментальных данных и результата моделирования для решетки, состоящей из спиралей с углом подъема $35^{\circ}\pm 3^{\circ}$, позволяет сделать вывод, что вблизи резонансной частоты разность значений угла поворота плоскости поляризации не превышает 9 %.

На основании аналитического выражения для киральной восприимчивости среды с сильными киральными свойствами проведено моделирование в

СВЧ диапазоне киральных свойств образцов искусственных сред, состоящих из упорядоченных спиральных элементов с углом подъема 35° и 53° . Сравнение экспериментальных данных и результатов моделирования, проведенного средствами Mathcad (рисунок 1) позволяет найти значение комплексной величины коэффициента ослабления электромагнитного поля внутри металлической спирали τ , параметра киральности α_{me} отдельной спирали вблизи резонансной частоты и значение кирального параметра κ' для всего образца в исследуемом диапазоне частот:

– образец, содержащий левосторонние одновитковые спирали с углом подъема 35° : $\tau = 5,105 \cdot 10^{-5} - i \cdot 2,552 \cdot 10^{-5}$, $\alpha_{me} = -4,033 \cdot 10^{-5} - i \cdot 8,067 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$;

– образец, содержащий правосторонние одновитковые спирали с углом подъема 53° : $\tau = 12,48 \cdot 10^{-5} - i \cdot 2,495 \cdot 10^{-5}$, $\alpha_{me} = -2,963 \cdot 10^{-5} + i \cdot 1,482 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$.



Штриховой линией с маркером показана экспериментальная зависимость, сплошной линией – результат моделирования,

штриховой линией (а)–результат моделирования со смещением по частоте на 0,06 ГГц
штриховой линией (б)–результат моделирования со смещением по частоте на 0,08 ГГц

Рисунок 1 – Сравнение результатов экспериментального исследования и аналитического моделирования частотной зависимости угла поворота плоскости поляризации СВЧ волны, прошедшей через образец двумерной решетки, состоящей из одновитковых металлических спиральных элементов с углом подъема $35^\circ \pm 3^\circ$ (а) и $53^\circ \pm 3^\circ$ (б)

Сравнение экспериментальных графиков и результата моделирования позволяет сделать вывод, что предложенная модель в рамках рассчитанных погрешностей описывает свойства искусственной структуры с большой киральностью в СВЧ диапазоне. Направление поворота плоскости поляризации волны, рассчитанное на основании предложенной модели, соответствует направлению поворота, наблюдаемому на эксперименте.

Определение данных параметров необходимо для проведения дальнейших исследований по созданию слабо отражательных покрытий, метаматериалов с отрицательным преломлением электромагнитных волн на основе спиральных элементов, а также для реализации волнового обтекания цилиндрических объектов в СВЧ диапазоне.

В четвертой главе проведен расчёт электрического дипольного $\vec{p}$ и магнитного $\vec{m}$ моментов, возникающих в спирали под действием падающей электромагнитной волны с учетом распределения тока в спирали.

Получено условие излучения спиралью циркулярно поляризованной волны

$$|p_x| = \frac{1}{c} |m_x|.$$

При выполнении этого условия киральные свойства спирали проявляются наиболее явно, поскольку электрическое поле падающей волны возбуждает в спирали не только электрический дипольный момент p_x , но и не менее значимый магнитный момент m_x (ось ox совпадает с осью спирали).

Используя данное равенство, а также условия главного частотного резонанса (длина проволоки, из которой изготовлена спираль, равна половине длины волны), вычислены параметры спирали, необходимые для бокового излучения циркулярно поляризованной волны (таблица 1).

Таблица 1– Значения угла подъема спирали для различного числа витков, при которых возможно боковое излучение спиралью циркулярно поляризованной волны

N	1	2	3	4	5	6	7	8
α , град	13,65	7,1	4,75	3,6	2,9	2,4	2,0	1,8

Как следует из данных, приведенных в таблице 1, излучение циркулярно поляризованной волны возможно как при нечетном, так и при четном числе витков спирали. При увеличении числа витков интенсивность волны, излучаемой спиралью, быстро убывает. Следовательно, оптимальным числом витков является $N=1$ и $N=2$.

Для спирали, состоящей из одного витка, следует исключить влияние компонент электрического и магнитного моментов, ортогональных оси спирали. Поэтому для получения циркулярно поляризованной волны необходимо, чтобы волновой вектор излучаемой волны был ортогонален плоскости, проходящей через ось спирали и ее концы.

В спирали с двумя витками распределение тока является более симметричным, и излучение циркулярно поляризованной волны имеет место при любой ориентации концов спирали относительно волнового вектора излучаемой волны.

На основании полученных результатов найдены значения геометрических параметров спирали, при которых возможно излучение спиралью циркулярно поляризованной волны, если спираль возбуждается линейно поляризованной СВЧ волной.

Проведено моделирование методом конечных элементов частотной зависимости коэффициента эллиптичности для одиночных одновитковых спиралей с углом подъема $13,65^\circ$ и двухвитковых с углом подъема $7,1^\circ$, и решеток, состоящей из таких спиралей. Моделирование проведено для различной ориентации плоскости поляризации падающей линейно поляризованной электромагнитной волны относительно оси спиралей.

Моделированием продемонстрирована возможность преобразования поляризации падающей на искусственный образец линейно поляризованной волны в отраженную циркулярно поляризованную в области частот, близкой к резонансной. Показано, что такое преобразование возможно на одновитковых спиральях с углом подъема $13,65^\circ$ или двухвитковых – с углом подъема $7,1^\circ$ и на решетках, состоящих из таких спиралей. Также доказано, что для получения циркулярно поляризованной волны с помощью спирали, состоящей из одного витка с углом подъема $13,65^\circ$, или на решетке, состоящей из таких спиралей, необходимо, чтобы волновой вектор излучаемой волны был ортогонален плоскости, проходящей через ось спирали и ее концы. Для спирали с двумя витками с углом подъема $7,1^\circ$ и для решетки, состоящей из таких спиралей излучение циркулярно поляризованной волны имеет место при любой ориентации концов спирали относительно волнового вектора излучаемой волны.

Сравнение результатов моделирования, проведенного для одиночной спирали и двумерной решетки, состоящей из таких спиралей, позволяет сделать вывод о достаточно высокой степени соответствия полученных результатов.

Для подтверждения теоретических расчетов и результатов моделирования изготовлены экспериментальные образцы, содержащие одновитковые левосторонние (рисунок 2а) и двухвитковые правосторонние (рисунок 2б) спиральные элементы с параметрами, рассчитанными в таблице 1:

- 1) $N = 1$; $\alpha = 13^\circ \pm 1^\circ$; $L = 0,05$ м; $r = 7,75 \cdot 10^{-3}$ м; $h = 0,012$ м; $d = 1 \cdot 10^{-3}$ м;
- 2) $N = 2$; $\alpha = 7^\circ \pm 1^\circ$; $L = 0,05$ м; $r = 3,95 \cdot 10^{-3}$ м; $h = 3,1 \cdot 10^{-3}$ м; $d = 0,4 \cdot 10^{-3}$ м,

где N – число витков спирали; α – угол подъема спирали относительно плоскости, перпендикулярной оси спирали; L – длина проволоки, из которой изготовлена спираль; r – радиус витка; h – шаг спирали; d – диаметр проволоки.

Проведены экспериментальные исследования взаимодействия падающей линейно поляризованной электромагнитной волны с изготовленными образцами. Измерения выполнены при различной ориентации плоскости поляризации падающей линейно поляризованной электромагнитной волны относительно оси спиралей (0° , 45° и 90°). Результаты экспериментальных исследований представлены в виде графиков на рисунке 3.

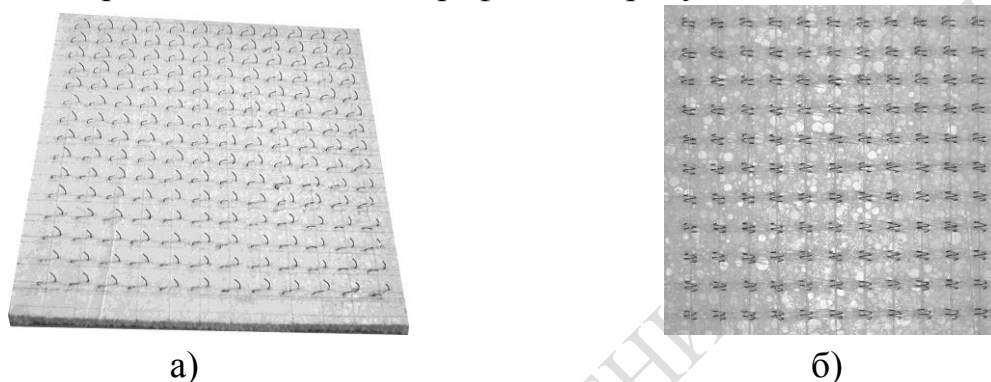


Рисунок 2 – Образцы двумерных решеток, состоящих из упорядоченных одновитковых левосторонних спиральных элементов с углом подъема $13^\circ \pm 1^\circ$ (а) и двухвитковых правосторонних спиральных элементов с углом подъема $7^\circ \pm 1^\circ$ (б)

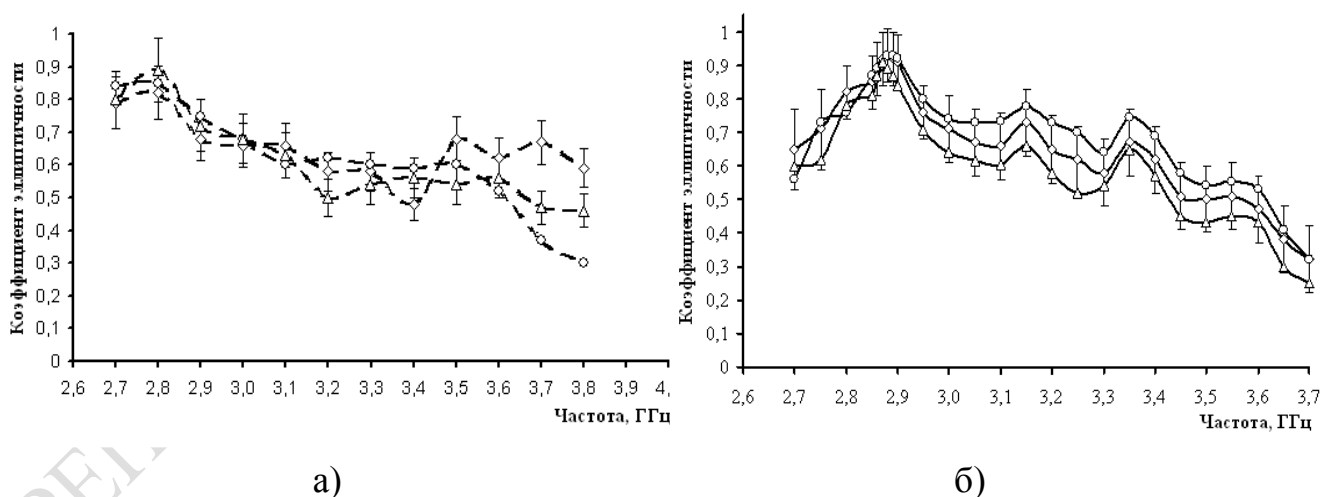


Рисунок 3 – Частотная зависимость коэффициента эллиптичности электромагнитной волны, отраженной от образцов двумерных решеток, состоящих из упорядоченных одновитковых левосторонних спиральных элементов с углом подъема $13^\circ \pm 1^\circ$ (а) и двухвитковых правосторонних спиральных элементов с углом подъема $7^\circ \pm 1^\circ$ (б)

Анализ графиков частотной зависимости коэффициента эллиптичности электромагнитной волны, отраженной от двумерной решетки (рисунок 3)

показывает, что коэффициент эллиптичности не зависит от ориентации вектора $\vec{E}$ падающей волны относительно осей спиральных элементов и достигает значения $0,9 \pm 0,1$ для решетки, состоящей из одновитковых левосторонних спиральных элементов с углом подъема $13^\circ \pm 1^\circ$ (рисунок 3а) при частоте падающего излучения 2,8 ГГц. Для решетки состоящей из двухвитковых правосторонних спиральных элементов с углом подъема $7^\circ \pm 1^\circ$, максимальное значение коэффициента эллиптичности отраженной волны достигается на частоте 2,9 ГГц и равняется $0,93 \pm 0,07$.

Таким образом, экспериментально подтверждена возможность преобразования линейно поляризованной волны в циркулярно поляризованную с помощью решетки из одновитковых спиралей с углом подъема $13^\circ \pm 1^\circ$ или двухвитковых с углом подъема $7^\circ \pm 1^\circ$ в области частот, близкой к резонансной.

На основе проделанных исследований можно сделать заключение о проведенной в работе разработке теоретических основ преобразователей поляризации электромагнитных волн на основе искусственных сред со спиральной структурой, с целью трансформации падающей линейно поляризованной волны в циркулярно поляризованную отраженную волну.

В пятой главе проведен теоретический расчет и оптимизация расположения микровключений в матрице для создания слабо отражающих структур.

В качестве составных элементов искусственной слабо отражающей структуры выбраны спирали, поскольку они характеризуются одновременно диэлектрическими и магнитными восприимчивостями. Сочетание диэлектрических и магнитных свойств и более того, их равенство, является необходимым условием проявления киральных свойств.

Однако каждая спираль характеризуется также магнитоэлектрической восприимчивостью, поскольку не обладает зеркальной симметрией и проявляет киральные свойства.

Если киральные свойства будут присущи образцу в целом, то это может вызвать поляризационную селективность искусственного материала. Следовательно, киральные свойства искусственного слабо отражательного образца должны быть скомпенсированы. С этой целью предложено использовать пары, состоящие из правой и левой спирали с параметрами, обеспечивающими индуцирование линейно поляризованной электромагнитной волной СВЧ диапазона эквивалентных электрического дипольного и магнитного моментов (удовлетворяющих условию $p=m/c$), такие параметры рассчитаны в четвертой главе.

Пары спиралей ориентированы в плоскости искусственного образца во взаимно перпендикулярных направлениях. Это позволяет достичь одинаковых

свойств образца по отношению к волне с произвольной поляризацией в случае нормального падения. Схематично такая структура показана на рисунке 4.

Рассмотрено влияние электрического $\vec{E}$ и магнитного поля $\vec{B}$ на пары горизонтально и вертикально расположенных спиралей. Рассчитано электрическое поле отраженной волны, созданное электрическим дипольным и магнитным моментом. Показано, что если спирали имеют параметры, при которых выполняется соотношение ($p=m/c$) то вблизи резонансной частоты при любой ориентации плоскости поляризации падающей волны, в случае нормального падения, отраженная волна будет отсутствовать.

Для проведения экспериментальных исследований изготовлены искусственные образцы двумерных решеток, состоящих из одновитковых спиралей с углом подъема $13^\circ \pm 1^\circ$ и двухвитковых – с углом подъема $7^\circ \pm 1^\circ$:

№ 1 – образец двумерной решетки, состоящей из 81 (9×9) взаимно ортогональной пары, содержащей левосторонние и правосторонние одновитковые спиральные элементы, с расстоянием между парами 5 см ;

№ 2 – образец двумерной решетки, состоящей из 144 (12×12) взаимно ортогональных пар, содержащих левосторонние и правосторонние одновитковые спиральные элементы, с расстоянием между парами 3,5 см;

№ 3 – образец двумерной решётки, состоящей из 81 (9×9) взаимно ортогональной пары, содержащей левосторонние и правосторонние двухвитковые спиральные элементы с расстоянием между парами 5 см;

№ 4 – образец двумерной решётки, состоящей из 169 (13×13) взаимно ортогональных пар, содержащих левосторонние и правосторонние двухвитковые спиральные элементы с расстоянием между парами 3 см;

№ 5 – образец двумерной решётки, состоящей из 196 (14×14) взаимно ортогональных пар, содержащих левосторонние и правосторонние двухвитковые спиральные элементы с расстоянием между парами 3 см;

№ 6 – образец двумерной решётки, состоящей из парных линейных вибраторов длиной 5 см и с расстоянием между парами 6 см.

Проведено экспериментальное исследование взаимодействия нормально падающей линейно поляризованной электромагнитной волны с образцами

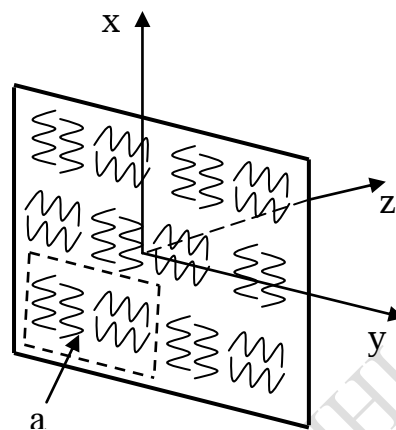


Рисунок 4 – Схема расстановки спиралей в искусственной слабо отражающей структуре (а – элементарная структурная ячейка образца)

№№ 1 – 6 двумерной решётки при различной ориентации вектора $\vec{E}$ падающей волны (рисунок 5):

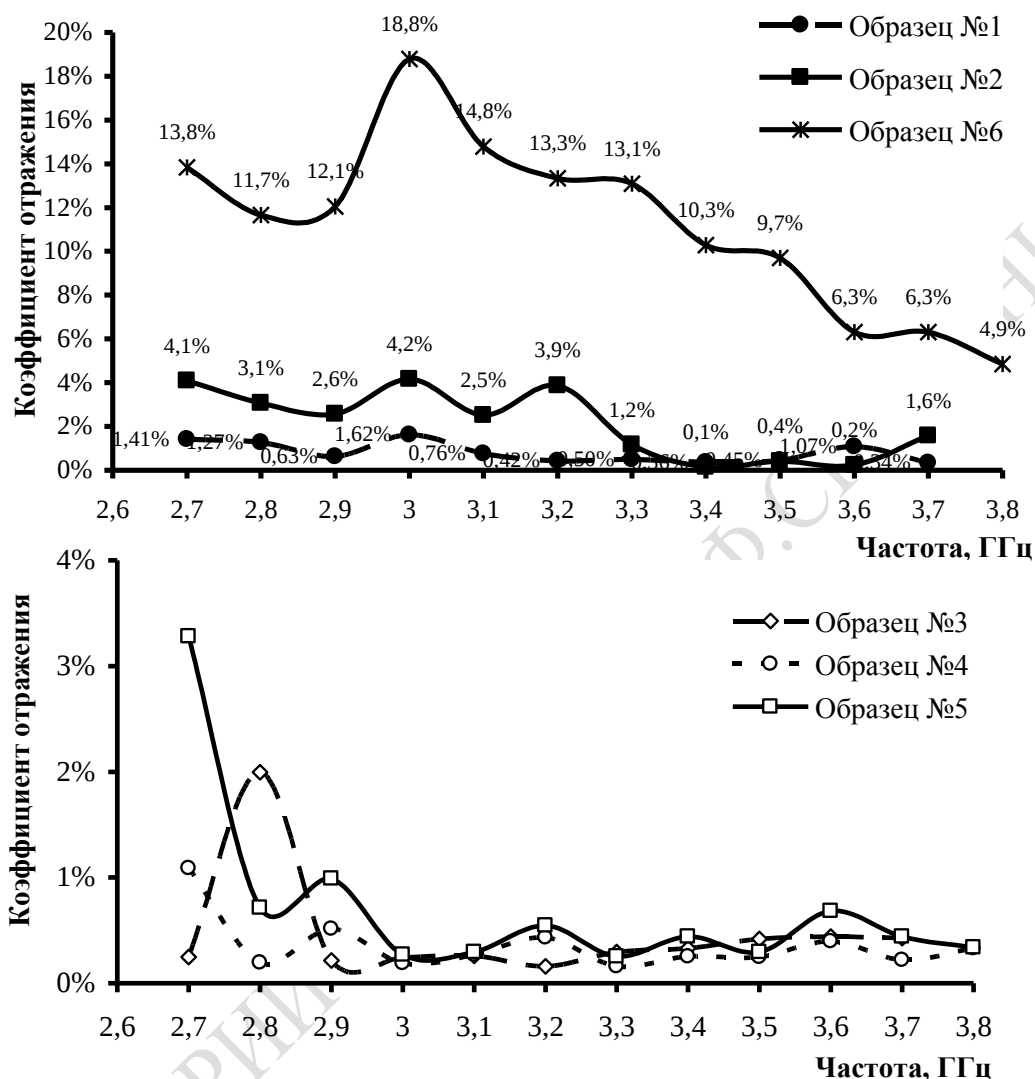


Рисунок 5 – Частотная зависимость коэффициента отражения электромагнитной волны при её взаимодействии с образцами № 1-6 (падающая волна имеет вертикальную поляризацию)

Результаты эксперимента подтвердили слабые отражающие свойства образцов, состоящих из парных взаимно ортогональных спиралей по сравнению с линейными резонаторами и показали преимущество образцов, состоящих из двухвитковых спиральных элементов, перед образцами на основе одновитковых спиралей, при их использовании в качестве слабо отражающих покрытий. При этом прошедшая волна всегда остается линейно поляризованной, что значительно упрощает расчет при разработке и создании структур (состоящих из таких элементов), в которых возможна реализация волнового обтекания цилиндрических объектов в СВЧ диапазоне.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Проведен расчет параметров спиральных элементов на основе модели молекулярной оптической активности с учетом аналогии между спиралевидной молекулой и металлической спиралью. Показано, что максимальное значение удельной вращательной способности соответствует углу подъема спирали $35^{\circ}16'$ и может быть достигнуто при числе витков спирали, равном единице [6].

2. Экспериментально продемонстрировано, что искусственные образцы, состоящие из одного слоя упорядоченных спиральных элементов с углом подъема $35^{\circ}\pm 3^{\circ}$ или $53^{\circ}\pm 3^{\circ}$, поворачивают плоскость поляризации отраженной волны на угол $20^{\circ}\pm 3^{\circ}$ в диапазоне частот, близких к резонансной [3, 6, 13].

3. Проведено моделирование в СВЧ диапазоне киральных свойств образцов искусственной среды, состоящих из упорядоченных спиральных элементов с углом подъема 35° и 53° . Из сравнения экспериментальных данных и результатов моделирования найдены значения коэффициента ослабления электромагнитного поля внутри отдельной металлической спирали, параметр киральности отдельной спирали вблизи резонансной частоты и значение кирального параметра для всего образца в исследуемом диапазоне частот. Показано, что предложенная модель качественно описывает свойства искусственной структуры с большой киральностью в СВЧ диапазоне [9, 20].

4. Проведен расчёт электрического дипольного и магнитного моментов, возникающих в спирали под действием падающей электромагнитной волны, с учетом распределения тока в спирали по гармоническому закону. Исходя из этих расчетов получено условие бокового излучения спиралью циркулярно поляризованной волны [1, 4, 7, 16, 27, 28].

5. С помощью моделирования и экспериментальным путем продемонстрирована возможность преобразования поляризации падающей на искусственный образец линейно поляризованной волны в отраженную циркулярно поляризованную в области частот, близкой к резонансной. Теоретически и экспериментально показано, что такое преобразование возможно на искусственных образцах, состоящих из одновитковых спиралей с углом подъема $13^{\circ}\pm 1^{\circ}$ или двухвитковых – с углом подъема $7^{\circ}\pm 1^{\circ}$ [2, 4, 7, 14, 16, 17, 18, 25, 27, 28].

6. В результате моделирования и экспериментальных измерений, доказано, что для получения циркулярно поляризованной волны с помощью спирали с углом подъема $13^{\circ}\pm 1^{\circ}$, состоящей из одного витка, необходимо, чтобы волновой вектор излучаемой волны был ортогонален плоскости, проходящей через ось спирали и ее концы; для спирали с двумя витками и

углом подъема $7^{\circ} \pm 1^{\circ}$ излучение циркулярно поляризованной волны имеет место при любой ориентации концов спирали относительно волнового вектора излучаемой волны [2, 4, 7, 14, 16, 17].

7. Проведен теоретический расчет и оптимизация расположения микровключений в матрице для создания слабо отражающих структур. В качестве составных элементов искусственной слабо отражающей структуры предложены спирали, поскольку они характеризуются одновременно диэлектрическими и магнитными восприимчивостями, но для компенсации киральных свойств предложено использовать пары, состоящие из правой и левой спирали. Пары спиралей ориентированы в плоскости искусственного образца во взаимно перпендикулярных направлениях, что позволяет достичь одинаковых свойств образца по отношению к волне с произвольной поляризацией в случае нормального падения, при сохранении линейной поляризации прошедшей волны [5, 8].

Рекомендации по практическому использованию результатов диссертации

Результаты работы могут быть использованы при расчетах и создании слабо отражающих экранов, создании поглощающих покрытий на основе киральных структур, при создании частотных и поляризационно-селективных СВЧ фильтров и преобразователей поляризации [27, 28].

Параметры искусственной среды, рассчитанные в третьей главе работы (коэффициент ослабления поля внутри отдельной металлической спирали, толщина скин - слоя, киральная восприимчивость спирали, параметр киральности всего образца), будут использованы при проведении дальнейших исследований по созданию слабо отражающих покрытий, а также метаматериалов с отрицательным преломлением электромагнитных волн.

Результаты, полученные в пятой главе, будут использованы при проведении исследований по разработке и созданию структур, в которых возможна реализация волнового обтекания цилиндрических объектов в СВЧ диапазоне.

Результаты, представленные в диссертационной работе, используются в учебном процессе физического факультета УО «Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины» при подготовке студентов физических специальностей (имеется 4 акта о внедрении результатов диссертации в учебный процесс).

Список публикаций соискателя по теме диссертации

Статьи в научных журналах

1. 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.
2. 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.
3. 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. – P. 119–233.
4. 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.
5. Семченко, И. В. Использование парных спиралей оптимальной формы для создания слабо отражающих покрытий в СВЧ диапазоне / И. В. Семченко, С. А. Хахомов, А. Л. Самофалов // Проблемы физики, математики и техники. – 2009. – № 1. – С. 33–39.
6. Самофалов, А. Л. Использование спиральных излучателей для преобразования поляризации электромагнитных волн / А. Л. Самофалов // Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. – 2009. – № 4 (55), Ч. 2. – С. 176–183.
7. Семченко, И. В. Оптимальная форма спирали: равенство диэлектрических, магнитных и киральных свойств / И. В. Семченко, С. А. Хахомов, А. Л. Самофалов // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2009. – Т. 2, № 5. – С. 30–36.
8. 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. – P. 33002.
9. Самофалов, А. Л. Моделирование и исследование искусственных анизотропных структур с большой киральностью в СВЧ диапазоне / А. Л. Самофалов, И. В. Семченко, С. А. Хахомов // Проблемы физики, математики и техники. – 2011. – № 3 (8). – С. 28–31.

10. 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. 64–67.

Статьи в сборниках научных трудов и материалов конференций

11. Самофалов, А. Л. Моделирование анизотропных и гиротропных материалов для преобразования СВЧ излучения / А. Л. Самофалов // Творчество молодых 2001 : сборник научных работ студентов и аспирантов Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины / ГГУ им. Ф. Скорины; под ред. Д. Г. Лина. – Гомель, 2001. – С. 25–26.

12. Самофалов, А. Л. Экспериментальное исследование поляризации электромагнитного излучения, рассеянного на одновитковой металлической спирали / А. Л. Самофалов // Творчество молодых 2002 : сборник научных работ студентов и аспирантов Учреждения образования «Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины» / ГГУ им. Ф. Скорины; под ред. Д. Г. Лина. – Гомель, 2002. – С. 47–48.

13. 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 Conference on Complex Media and Metamaterials, Het Pand, Ghent, Belgium, 22–24 September 2004. – Het Pand, Ghent, Belgium, 2004. – P. 74–77.

14. Semchenko, I. V. Rotation 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 Conference on Complex Media and Metamaterials, Het Pand, Ghent, Belgium, 22–24 September 2004. – Het Pand, Ghent, Belgium, 2004. – P. 236–239.

15. Семченко, И. В. Взаимодействие электромагнитных волн СВЧ диапазона с искусственными киральными средами / И. В. Семченко, С. А. Хахомов, А. Л. Самофалов // Юбилейная научно-практическая конференция, посвященная 75-летию со дня основания Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины: материалы научно-практической конференции, Гомель, 14–15 июня 2005 г. / ГГУ им. Ф. Скорины; редкол.: Д. Г. Лин [и др.]. – Гомель, 2005. – С. 90–91.

16. 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. / ИФ НАН Беларуси; редкол.: А. М. Гончаренко (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2005. – С. 55–62.

17. 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 Conference on Complex Media and Metamaterial*, Samarkand, Uzbekistan, 25–28 September 2006. – Helsinki University of Technology, Helsinki, 2006. – P. 24–25.

18. 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, 2008. – P. 71–80.

19. 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, 2008. – P. 444–449.

20. 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, 2011. – С. 27 – 31.

Тезисы докладов

21. Самофалов, А. Л. Моделирование искусственных гиротропных и анизотропных сред для СВЧ диапазона с использованием металлических спиральных элементов / А. Л. Самофалов // *Физика конденсированных сред: тезисы докладов IX Республиканской научной конференции магистрантов и аспирантов*, Гродно, 2–4 мая 2001 г. / УО ГрГУ им. Я. Купалы; под ред. В. А. Лиопо. – Гродно, 2001. – С. 268–270.

22. Experimental investigation of polarization plane rotation of U.H.F. waves scattered by metal helix / I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov, A. L. Samofalov, V. I. Kondratenko // *International Conference «Problems of Interaction of Radiation with Matter»: Book of Abstracts*, Gomel, Belarus, 30 October – 1 November 2001. – Gomel, Belarus. – P. 76–77.

23. Самофалов, А. Л. Моделирование естественной оптической активности в микроволновом диапазоне: дипольное и квадрупольное излучение уединенной спирали / А. Л. Самофалов // *Оптика-2003 : труды третьей международной конференции молодых ученых и специалистов*, Санкт-

Петербург, 20–23 октября 2003 г. / СПбГУ ИТМО; под ред. проф. С. А. Козлова. – СПб, 2003. – С. 361.

24. Самофалов, А. Л. Расчет дипольного и магнитно-дипольного излучения спирали в свободном пространстве / А. Л. Самофалов, В. В. Ковалев // Физика конденсированного состояния : тезисы докладов XI Республиканской научной конференции студентов, магистрантов и аспирантов, Гродно, 23–25 апреля 2003 г. / УО ГрГУ им. Я. Купалы; под ред. В. А. Лиопо. – Гродно, 2003. – С. 205–206.

25. Преобразование поляризации электромагнитной волны искусственной двумерной решеткой из одновитковых спиралей / И. В. Семченко, С. А. Хахомов, А. Л. Самофалов, С. А. Третьяков // Проблемы взаимодействия излучения с веществом: тезисы II международной научной конференции, Гомель, 1–3 ноября 2006 г. / ГГУ им. Ф. Скорины, редкол.: С. А. Хахомов [и др.]. – Гомель, 2006. – С. 64–65.

26. Разработка искусственных безотражательных структур со спиральными элементами оптимальной формы для реализации возможности огибания цилиндрических объектов СВЧ волнами / И. В. Семченко, А. Л. Самофалов, В. С. Асадчий, И. А. Фаняев, С. А. Хахомов, С. А. Третьяков // III Конгресс физиков Беларуси: сборник тезисов и программа, Минск, 25–27 сентября 2011 г. / Под ред. С. Я. Килин. – Минск, 2011. – С. 61.

Патенты

27. Устройство для преобразования поляризации: пат. 9850 Респ. Беларусь: МПК7 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.

28. 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 // Патенты России. Официальный бюллетень «Изобретения. Полезные модели» (с полным описанием изобретений к патентам) [Электронный ресурс] : полнотекстовая база данных (602 Мб). – М: ФИПС, 2008. – № 4. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

РЕЗЮМЕ

Самофалов Андрей Леонидович

Преобразование электромагнитных волн СВЧ диапазона в искусственных киральных средах

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

Цель работы: исследование свойств искусственных двумерных решеток, состоящих из металлических спиралей с предварительно рассчитанными параметрами, и демонстрация их потенциального применения.

Методы исследования: 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: выполнен расчет параметров спиральных элементов на основе модели молекулярной оптической активности с учетом аналогии между спиралевидной молекулой и металлической спиралью. Показано, что максимальное значение удельной вращательной способности соответствует углу подъема спирали $35^{\circ}16'$ и может быть реализовано для одновитковой спирали. Проведено моделирование в СВЧ диапазоне киральных свойств образцов искусственной среды, состоящей из упорядоченных спиральных элементов с углом подъема, близким к 35° и 53° . Найдены коэффициент ослабления поля внутри отдельной металлической спирали, толщина скин-слоя, киральная восприимчивость спирали, а также параметр киральности всего образца. Проведен расчет электрического дипольного и магнитного моментов, возникающих в спирали под действием падающей электромагнитной волны с учетом распределения тока в спирали по гармоническому закону, впервые получено условие излучения спиралью циркулярно поляризованной волны независимо от распределения тока в спирали и ориентации плоскости поляризации падающей волны относительно оси спиралей. Произведен теоретический расчет и оптимизация расположения спиральных микровключений в матрице для создания слабо отражающих структур. Проведено моделирование и экспериментальное подтверждение полученных результатов.

Результаты работы могут быть использованы при расчетах и создании слабо отражающих и поглощающих покрытий на основе спиралей, а также при разработке искусственных структур для реализации волнового обтекания цилиндрических объектов в СВЧ диапазоне.

РЭЗІЮМЭ
Самафалаў Андрэй Леанідавіч
Пераўтварэнне электрамагнітных хваль
ЗВЧ дыяпазону ў штучных кіральных асяроддзях

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

Мэта працы: даследаванне ўласцівасцяў штучных двухмерных рашотак, якія складаюцца з металічных спіраляў з папярэдне разлічанымі параметрамі, і дэманстрацыя іх патэнцыйнага ўжывання.

Метады даследавання: пры правядзенні мадэлявання выкарыстаны метады канечных элементаў. Для эксперыментальных даследаванняў ужыта метадыка вымярэння палярызацыйнай характарыстыкі электрамагнітнай хвалі, заснаваная на выкарыстанні прыёмнай антэны з лінейнай палярызацыяй поля.

Атрыманыя вынікі: выкананы разлік параметраў спіральных элементаў на аснове мадэлі малекулярнай аптычнай актыўнасці з улікам аналогіі паміж спіралепадобнай малекулай і металічнай спіраллю. Паказана, што максімальнае значэнне ўдзельнай вярчальнай здольнасці адпавядае вуглу ўздыму спіралі $35^{\circ}16'$ і можа быць рэалізавана для аднавіткавай спіралі. Праведзена мадэляванне ў ЗВЧ дыяпазоне кіральных уласцівасцяў узораў штучнага асяроддзя, якое складаецца з упарадкаваных спіральных элементаў з вуглом уздыму, бліжэй да 35° і 53° . Знойдзены каэфіцыент паслаблення поля ўнутры асобнай металічнай спіралі, таўшчыня скін-слоя, кіральная ўспрымальнасць спіралі, а таксама параметр кіральнасці ўсяго ўзору. Праведзены разлік электрычнага дыпольнага і магнітнага момантаў, якія ўзнікаюць у спіралі пад дзеяннем падаючай электрамагнітнай хвалі з улікам размеркавання току ў спіралі па гарманічным законе, упершыню атрымана ўмова выпраменьвання спіраллю цыркулярна палярызаваанай хвалі незалежна ад размеркавання току ў спіралі і арыентацыі плоскасці палярызацыі падаючай хвалі адносна восі спіраляў. Зроблены тэарэтычны разлік і аптымізацыя размяшчэння спіральных мікраўключэнняў у матрыцы для стварэння структур, якія слаба адлюстроўваюць хвалі. Праведзена мадэляванне і эксперыментальнае пацвярджэнне атрыманых вынікаў.

Вынікі працы могуць быць выкарыстаны пры разліках і стварэнні пакрыццяў, якія слаба адлюстроўваюць хвалі, і паглынальных пакрыццяў на аснове спіраляў, а таксама пры распрацоўцы штучных структур для рэалізацыі хвалевага абцякання цыліндрычных аб'ектаў у ЗВЧ дыяпазоне.

SUMMARY

Samofalov Andrey Leonidovich

Transformation of electromagnetic waves of UHF range in artificial chiral media

Key words: spiral element, chirality, polarization, electric dipole moment, magnetic moment.

The subject of research: The investigation of the properties of artificial two-dimensional lattices composed of metal helices with pre-calculated parameters, and the demonstration of their potential applications.

The methods of research: during the simulation the finite element method has been used. For experimental studies methods of measuring of the polarization characteristics of the electromagnetic wave have been applied, which are based on the use of the receiving antenna of a linearly polarized field.

The research results: The calculation of the parameters of the spiral elements has been carried out on the basis of the model of molecular optical activity with the analogy between a molecule and a metal helix. It is shown that the maximum value of the specific rotatory power of the helix corresponds to the pitch angle $35^{\circ}16'$ and can be implemented for a single turn of the helix. The simulation has been performed in the microwave range of chiral properties of the samples of the artificial media, which consist of ordered elements with the helix pitch angle close to 35° and 53° . The attenuation coefficient of the field within a single metal helix, the thickness of the skin layer, the chiral susceptibility of the helix and the chirality parameter of the whole sample have been obtained. The calculation of the electric dipole and magnetic moments, resulting in the helix under the influence of an incident electromagnetic wave has been carried out. The harmonical distribution of the current in the helix has been taken into account. For the first time, the condition under which the helix radiate the circularly polarized wave has been obtained regardless of the current distribution in helix and orientation of the plane of polarization of the incident wave with respect to the axis of helices. The theoretical calculation and optimization of the location of the spiral micro-inclusions in the matrix have been performed to create the low-reflectivity structures. The simulation and experimental verification of the results have been carried out.

The results can be used at calculations and creation of weakly reflecting and absorbing coatings based on helices and at the development of artificial structures for wave flow realization of cylindrical objects in the UHF range.