

ГОМЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ ФРАНЦИСКА СКОРИНЫ

И. В. Семченко, С. А. Хахомов

**ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ
В МЕТАМАТЕРИАЛАХ
И СПИРАЛЬНЫХ СТРУКТУРАХ**

Минск
«Беларуская навука»
2019

Семченко, И. В. Электромагнитные волны в метаматериалах и спиральных структурах / И. В. Семченко, С. А. Хахомов ; Гомел. гос. ун-т им. Ф. Скорины. — Минск : Беларуская наука, 2019. — 279 с. : ил. — Библиогр. : с. 250—274.

УДК 537.86:620.22-022.532

ББК 22

Чит. зал №1 — 2 экз.

Монография посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию свойств метаматериалов, метаповерхностей и спирально-структурированных систем, выявлению для них условий преобразования поляризации электромагнитных волн, подавления отраженной волны при поглощении прошедшей волны, а также обоснованию возможностей практического применения физических свойств и явлений, характерных для указанного класса сред.

Результаты работы могут быть использованы при расчетах и создании слабо отражающих поглощающих экранов на основе спирально-структурированных метаматериалов, при создании частотных и поляризационно-селективных фильтров и преобразователей поляризации в сверхвысокочастотном, терагерцовом и дальнем инфракрасном диапазонах.

Книга рассчитана на научных и инженерных работников в области оптики, радиофизики, биофизики, физики конденсированного состояния, электроники, а также на студентов старших курсов, магистрантов и аспирантов физических специальностей.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	7
Принятые сокращения и условные обозначения	14
Введение	15
Глава 1. Аналитический обзор литературы	24
1.1. Киральность	24
1.2. Метаматериалы на основе спиральных элементов и их практическое применение	29
1.2.1. Использование спиральных элементов при конструировании сред с отрицательными значениями диэлектрической и магнитной проницаемостей	29
1.2.2. Использование спиральных элементов для маскировки объектов в результате волнового обтекания	32
1.2.3. Метаматериалы на основе элементов спиральной формы и их практические приложения	36
1.2.3.1. Метаматериалы спиральной формы	37
1.2.3.2. Молекулы спиральной формы	38
1.3. Методы изготовления метаматериалов	40
1.3.1. Нанотехнологии на основе ДНК	40
1.3.2. Методы создания искусственных киральных материалов и метаматериалов	43
1.4. Методы изготовления фотонных кристаллов и модификации их свойств	51
1.5. Оптические 2D- и 3D-метаматериалы	54
1.6. Обоснование выбора объекта исследования	57
Глава 2. Этапы, методы и условия экспериментальных исследований	60
2.1. Этапы и методы исследований	60
2.2. Методика изготовления двумерных периодических массивов на основе спиральных элементов для сверхвысокочастотного диапазона волн	61
2.3. Методика изготовления экспериментальных образцов с использованием магнетронного распыления	63
2.4. Методика изготовления экспериментальных образцов на основе спиральных элементов для исследований в терагерцовом диапазоне волн	67
2.4.1. Методика изготовления вмещающих сред как основы комплексных материалов, содержащих металлические включения спиральной формы	73
2.5. Используемое оборудование	77
2.5.1. Безэховая камера	77
2.5.2. Радиопоглощающие материалы	79
2.5.3. Экспериментальное оборудование	82
2.5.3.1. Приемник измерительный П15-5Б	82

2.5.3.2. Генератор сигналов высокочастотный Г4-80	83
2.5.3.3. Рупорная антенна П6-23А	83
2.5.3.4. Измерение поляризационной характеристики электромагнитной волны, рассеянной на двумерном массиве	84
2.5.3.5. Экспериментальные комплексы	86
2.6. Общая методика теоретических исследований	96
2.7. Методика статистической обработки результатов исследований	96
Глава 3. Искусственные спирально-структурированные системы из элементов с оптимальными параметрами для сверхвысокочастотного диапазона	98
3.1. Преобразование поляризации электромагнитных волн посредством спиральных излучателей	98
3.1.1. Расчет электрического дипольного и магнитного моментов, возникающих в спирали под действием падающей волны	99
3.1.2. Вычисление параметров спирали, необходимых для пассивного излучения циркулярно поляризованной волны в условиях резонанса. Учет числа витков спирали	102
3.1.3. Экспериментальное исследование электромагнитного излучения, отраженного двумерной киральной структурой	106
3.2. Оптимальная форма спирали: одинаково высокая значимость диэлектрических, магнитных и киральных свойств	107
3.3. Моделирование безотражательного огибания электромагнитной волной цилиндрических объектов	114
3.3.1. Изготовление образцов искусственных безотражательных структур со спиральными элементами оптимальной формы для реализации возможности огибания цилиндрических объектов сверхвысокочастотными волнами	116
3.3.2. Моделирование искусственных структур с гладкими спиральными элементами оптимальной формы для реализации возможности огибания цилиндрических объектов сверхвысокочастотными волнами	117
3.4. Взаимодействие электромагнитных волн с упорядоченными микроспиралями при различных углах падения	121
3.4.1. Наклонное падение волн. Геометрия задачи	121
3.4.2. Собственные волны	122
3.4.3. Решение граничной задачи. Коэффициенты отражения и прохождения	124
3.4.4. Значительная анизотропия метаматериала и проявление эффекта Брюстера для обеих поляризаций падающей волны	130
3.5. Электромагнитные волны в одноосной киральной сверхрешетке с комбинированными диэлектрическими и магнитными свойствами	135
3.5.1. Собственные моды	137
3.5.2. Эффект компенсации двулучепреломления	138
3.6. Нормальное падение волн на спиральную структуру	139
3.6.1. Постановка задачи	139
3.6.2. Численный анализ	146
3.7. Электродинамика искусственных композитных спиральных и омега-структур в микроволновом диапазоне	148
3.7.1. Влияния локального омега-параметра на брэгговское отражение электромагнитных волн при их взаимодействии со спиральными структурами, содержащими омега-включения	151
3.7.2. Изучение вращения плоскости поляризации электромагнитных волн при их взаимодействии со спиральными структурами, содержащими омега-включения	153
3.7.3. Расчет и оптимизация параметров массива омега-элементов для достижения максимального поглощения при минимальном отражении волн	154

Глава 4. Искусственные спирально-структурированные системы с оптимальными параметрами и их свойства в терагерцовом диапазоне	165
4.1. Исследование свойств искусственных анизотропных структур с большой киральностью	165
4.1.1. Оптимальная форма спирали: равенство диэлектрической, магнитной и киральной восприимчивостей.	167
4.1.2. Аналитическое и численное моделирование частотной зависимости для диэлектрической и магнитной восприимчивостей и параметра киральности	168
4.1.2.1. Расчет параметров спиральных элементов. Сравнение двух методик	172
4.1.2.2. Расчет параметров спиральных элементов, основанный на модели молекулярной оптической активности	172
4.1.2.3. Расчет параметров спирали с учетом входного сопротивления	174
4.1.3. Спиральная модель молекул вещества применительно к искусственной структуре с большой киральностью	177
4.1.4. Сравнение результатов эксперимента и численного моделирования	180
4.2. Исследование свойств слабоотражающих метаматериалов с компенсированной киральностью	183
4.2.1. Оптимизация расположения спиралей в массиве	183
4.2.2. Оценка влияния каркасного полупроводникового цилиндра и емкости зазора между концами правой и левой спиралей	184
4.2.3. Определение параметров решетки на основе анализа отраженной и прошедшей волн	186
4.2.4. Сравнение результатов эксперимента с результатами численного моделирования.	188
4.3. Исследование свойств высокопоглощающего метаматериала с компенсированной киральностью на подложке	191
4.3.1. Решение граничной задачи и расчет коэффициентов пропускания и отражения электромагнитной волны от структуры метаматериал–подложка, содержащей поглощающий слабо отражающий двумерный массив искусственных бианизотропных элементов.	191
4.3.2. Сравнение результатов эксперимента и численного моделирования	197
4.4. Запасенная и поглощенная энергия поля в киральных однокомпонентных метаматериалах с потерями	200
4.4.1. Альтернативные подходы	202
4.4.1.1. Непоглощающие композиты	202
4.4.1.2. Поглощающие однокомпонентные среды.	204
4.4.1.3. Поглощающие киральные среды: зависимость от угла подъема спирали.	209
4.4.2. Численные примеры.	215
Глава 5. Электромагнитные волны в природных спирально-структурированных системах с оптимальными параметрами	219
5.1. Поляризационная селективность электромагнитного излучения молекулы дезоксирибонуклеиновой кислоты	219
5.1.1. Молекула дезоксирибонуклеиновой кислоты как периодическая структура.	221
5.1.2. Активированный участок молекулы дезоксирибонуклеиновой кислоты.	226
5.2. Определение оптимальной формы молекулы дезоксирибонуклеиновой кислоты в рамках энергетического подхода.	229
5.3. Спиральная модель молекул кирального вещества применительно к дезоксирибонуклеиновой кислоте.	232
5.4. Экспериментальная проверка результатов теоретического исследования	234

5.4.1. Экспериментальное исследование двойных и одинарных ДНК-подобных спиралей в сверхвысокочастотном диапазоне	234
5.4.2. Экспериментальное исследование дезоксирибонуклеиновой кислоты в оптическом диапазоне	242
Заключение	246
Основные научные результаты	246
Рекомендации по практическому использованию результатов	248
Литература и источники	250
Публикации авторов по теме исследования.	265
Предметный указатель	275
Summary	279