

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Национальный исследовательский университет  
«Высшая школа экономики»

*На правах рукописи*

Скуридин Андрей Андреевич

**Исследование электродинамических свойств грибовидных  
метаматериалов и разработка микроволновых частотно-селективных  
устройств на их основе**

РЕЗЮМЕ ДИССЕРТАЦИИ  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор  
Елизаров Андрей Альбертович

Москва – 2023

## **Актуальность**

На современном этапе развития радиоэлектроники и микроволновой техники значительно повысились требования, предъявляемые к микроволновым частотно-селективным устройствам (МЧСУ). В качестве ответа на эти вызовы, всё шире стали применяться метаматериалы, позволяющие значительно улучшить характеристики частотно-селективных устройств или добиться проявления свойств, недостижимых в классических электродинамических структурах. Одним из типов метаматериалов является так называемый грибовидный метаматериал – планарная структура, являющаяся вариантом реализации высокоимпедансной поверхности. Основными его достоинствами являются простота изготовления, возможность создания на его базе малогабаритных устройств различного назначения, а также широкие возможности по подстройке его параметров как на этапе разработки и конструирования, так и в реальном времени в процессе эксплуатации.

## **Состояние вопроса**

Одной из важных тенденций развития современных микроволновых частотно-селективных устройств является внедрение в них структур с метаматериалами с целью достижения лучших электрических и массогабаритных характеристик.

В связи с отсутствием общепризнанных методик точного расчёта параметров и синтеза МЧСУ на планарных грибовидных метаматериалах, при разработке подобных устройств приходится прибегать к различным приближённым аналитическим методам оценки характеристик метаматериала, и дальнейшей проверке этих оценок путём компьютерного моделирования. В настоящее время, в связи с широким применением методов численного моделирования и повышения вычислительных мощностей, планарные грибовидные метаматериалы нашли широкое применение в электродинамике и микроволновой технике [[1], 2, 3, 4].

В связи с быстро растущими требованиями к точности, а также ограничениями, присущими измерениям с помощью резонансных отрезков классических линий передач, широкое распространение получили чувствительные элементы, построенные на базе метаматериалов. Метаматериалы могут демонстрировать сильную локализацию и концентрацию электромагнитных полей, что повышает чувствительность и позволяет регистрировать даже малые изменения контролируемых величин, малые концентрации веществ или дефекты малых размеров в исследуемых средах [5, 6].

Резонансные свойства планарных грибовидных метаматериалов напрямую зависят от свойств составляющих их ячеек. В связи с этим существует возможность гибкой настройки частотно-селективных свойств устройств с планарным грибовидным метаматериалом путем внесения различных модификаций в структуру метаматериала, например, комбинирование различных типов или размеров ячеек для расширения или сдвига рабочих полос [7, 8].

Широкое применение планарные грибовидные метаматериалы нашли в антенной технике, где они используются в качестве слоя заземления и развязывающих элементов. Преимущество метаповерхностей перед обычными экранами при таком использовании заключаются в более эффективной отсечке паразитного обратного излучения и снижению сопутствующих этому потерь, подавлении поверхностных волн и возможности снижения габаритов антенны за счёт размещения излучателя непосредственно на метаповерхности без опасности её закоротить [9].

Метаматериалы, используемые в качестве вставок в волноводные тракты, проявляют свойства фильтра и позволяют получить как режекторные, так и полосовые фильтры, причем рабочая полоса последних может находиться ниже частоты отсечки самого волновода, что означает расширение его рабочего диапазона [10].

Благодаря простоте и дешевизне изготовления частотно-селективные поверхности на грибовидных метаматериалах стали доступным и широко распространённым решением при конструировании МЧСУ различного назначения.

### **Цель и задачи диссертационного исследования**

Целью диссертации является исследование физических и конструктивно-технологических особенностей грибовидных метаматериалов и разработка на их основе малогабаритных микроволновых частотно-селективных устройств различного функционального назначения с улучшенными электродинамическими параметрами и характеристиками.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующий ряд задач:

- анализ известных физических особенностей, методов проектирования, конструктивно-технологических решений и областей применения грибовидных метаматериалов, их преимуществ, недостатков и тенденций дальнейшего развития;
- анализ аналитических и численных методов, а также программных средств для компьютерного моделирования грибовидных метаматериалов;
- исследование влияния геометрических размеров ячеек грибовидных метаматериалов на их эквивалентные погонные параметры, дисперсионные и фазовые характеристики частотно-селективных поверхностей на грибовидных метаматериалах;
- компьютерное моделирование дисперсионных характеристик и S-параметров электродинамических структур и устройств на грибовидных метаматериалах;
- экспериментальное исследование макетов микроволновых частотно-селективных устройств на основе планарного грибовидного метаматериала и сравнение полученных характеристик с результатами аналитических расчётов и компьютерного моделирования.

## Положения, выносимые на защиту

На защиту выносятся перечисленные ниже новые положения, полученные в работе:

1. Для теоретического исследования дисперсионных свойств электродинамических структур на основе грибовидных метаматериалов и устройств на их основе наиболее эффективны приближённые аналитические методы расчёта, основанные на зависимостях между геометрическими размерами элементарных ячеек метаматериала, диэлектрической проницаемостью подложки и его амплитудно-частотными характеристиками.
2. Фаза электромагнитной волны, отражённой от конформной частотно-селективной поверхности на метаматериале может быть вычислена при помощи геометрического метода, основанного на использовании закона Снеллиуса и элементарной геометрии. За счёт изгиба частотно-селективной поверхности падающая электромагнитная волна проходит дополнительный путь, что приводит к увеличению сдвига фазы отражённой волны на величину, зависящую от радиуса кривизны поверхности.
3. Отрезок прямоугольного волновода при выполнении одной из его широких стенок в виде грибовидного метаматериала обеспечивает резонансные свойства, заключающиеся в возникновении полосы режекции колебаний, которая может быть расширена в 3,5 раза путём подбора значения относительной диэлектрической проницаемости материала подложки и геометрических размеров элементарных ячеек метаматериала;
4. Применение грибовидных элементарных ячеек двух кратных геометрических размеров (модулирования) в структуре широкой магнитной стенки резонансного отрезка прямоугольного волновода позволяет получить две полосы режекции, ширина которых может быть подстроена путём нанесения на поверхность элементарных ячеек метаматериала слоя ферромагнетика.

## **Методология исследования**

При проведении теоретической части исследования использовались теории электромагнитного поля, электрических цепей и сигналов; математические методы электродинамики и численные методы компьютерного моделирования. Для экспериментальной части исследования изготавливались макеты и проводилось их измерение с помощью лабораторного оборудования.

## **Достоверность научных положений, выводов и результатов**

Достоверность научных положений, представляемых на защиту, выводов, сделанных по итогам проведённого исследования, и результатов, полученных в процессе проведения исследования, подтверждается путём сравнительного анализа аналитических и численных расчётов, компьютерного моделирования и экспериментальных данных, согласованностью результатов, полученных в диссертационном исследовании, с выводами и результатами, представленными в отечественных и зарубежных публикациях других авторов.

## **Апробация работы**

Основные теоретические и практические результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

1. Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы электронного приборостроения», «Исследование чувствительного элемента на планарном грибовидном метаматериале», Саратов, 22-23 сентября, 2016.
2. Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы электронного приборостроения», «Waveguide Structures with Magnetic Walls on the Basis of the Mushroom-shaped Metamaterials», Саратов, 24-25 сентября, 2020.

3. Межвузовская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов им. Е.В. Арменского, «Исследование работы развязывающего фильтра на метаматериале», Москва, 17-29 февраля, 2016.
4. Межвузовская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов им. Е.В. Арменского, «Исследование режимов работы сенсора на планарном грибовидном метаматериале», Москва, 17 февраля – 1 марта, 2017.
5. Межвузовская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов им. Е.В. Арменского, «Моделирование сенсора на грибовидном метаматериале с ферритовым слоем», Москва, 19 февраля – 1 марта, 2018.
6. Международная отраслевая научно-техническая конференция «Технологии информационного общества», «Исследование малогабаритного развязывающего фильтра на метаматериале», 16-17 марта, Москва, 2016.
7. Международная отраслевая научно-техническая конференция «Технологии информационного общества», «Исследование микроволнового сенсора на грибовидном метаматериале для измерения физических величин и параметров технологических процессов», 15-16 марта, 2017.
8. 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP-2020), «Computer Simulations of Multiband Waveguide Filter on Modulated Metasurface», Копенгаген, 15-20 марта, 2020.
9. Eighteenth International Vacuum Electronics Conference (IVEC-2017), «Investigation of a rectangular waveguide with a magnetic wall made of mushroom-shaped metamaterial», Лондон, 24-26 апреля, 2017.
10. Eighteenth International Vacuum Electronics Conference (IVEC-2017), «Investigation of microwave sensor on the planar mushroom-shaped metamaterial», Лондон, 24-26 апреля, 2017.

11. International Conference on Computer Simulation in Physics and beyond (CSP 2020), «Investigation of Filtering and Sensing Properties of Complementary Metamaterial Resonant Cells by Computer Simulation», Москва, 12-16 октября, 2020.
12. 2018 12th International Congress on Artificial Materials for Novel Wave Phenomena (METAMATERIALS), «Metamaterial-based Sensor for Measurements of physical Quantities and Parameters of technological Processes», Эспоо, 27 августа – 1 сентября, 2018.
13. Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов в инфокоммуникациях «СИНХРОИНФО 2019», «Millimeter-wave metamaterial-based sensor for inhomogeneity detection and parameter control of technological substances», Ярославль, 1-3 июля, 2019.
14. 2020 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications SYNCHROINFO-2020, «Computer Model of a Frequency-Selective Surface on Mushroom-Shaped Metamaterial», Светлогорск, 1-3 июля, 2020.
15. 2022 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications SYNCHROINFO-2022, «Simulation of a Frequency Selective Surface with Fractal Jerusalem Cross Unit Cells», Архангельск, 29 июня – 1 июля, 2022.

### **Структура диссертации**

Диссертационное исследование содержит введение, четыре главы, заключение, список литературы, два приложения. Общий объем диссертации составляет 168 страниц. Иллюстрационный материал включает в себя 60 рисунков.

В первой главе диссертации рассматриваются физические принципы, на основе которых основана работа метаматериалов, а также приводится обзор публикаций, посвящённых их разработке и применению в микроволновой технике. В частности, показано, что поглощающие структуры на



метаматериалах демонстрируют уровень поглощения свыше 95% в определенных частотных диапазонах.

Также рассмотрено применение материалов в антенной технике, где их имплементация позволяет повысить коэффициент усиления антенн, направленность и снизить уровень перекрёстных помех путем развязки элементов антенных систем – все это при снижении или по крайней мере не увеличении габаритных размеров антенн.

Изучено применение метаматериалов в качестве элементов датчиков и сенсоров, в том числе предназначенных для работы с биологическими образцами. Обзор публикаций показал, что применение метаматериалов в конструкции подобных устройств является перспективным путем повышения их характеристик, в частности чувствительности. При этом также соблюдается условие миниатюризации. Также выявлено, что на основе частотно-селективных поверхностей на метаматериалах возможно создание перспективных устройств для неинвазивной диагностики различных новообразований в тканях человека. Отдельно отмечена возможность применения частотно-селективных поверхностей на метаматериалах для манипулирования свойствами падающих на них электромагнитных волн, в частности изменение их амплитуды, фазы, поляризации.

Во второй главе представлены два аналитических метода, позволяющих провести расчёт фазовых и дисперсионных свойств частотно-селективных поверхностей на грибовидном метаматериале. Аналитический метод расчёта дисперсионных характеристик позволяет определить коэффициент замедления частотно-селективных поверхностей на грибовидном метаматериале и оценить влияние на него диэлектрической проницаемости подложки метаматериала. Метод основан на зависимости дисперсионных свойств грибовидного метаматериала от геометрических параметров его элементарных ячеек. Геометрический метод расчёта фазового сдвига при отражении электромагнитной волны от конформной метаповерхности позволяет рассчитать дополнительный набег фазы, возникающий за счёт

изгиба и оценить влияние на его значение величины радиуса кривизны поверхности.

В третьей главе проведен обзор современных средств компьютерного моделирования электродинамических структур на метаматериалах и сделан вывод о целесообразности использования программного пакета CST Studio Suite и его модуля Microwave Studio для численного исследования разрабатываемых микроволновых устройств на грибовидном метаматериале.

В четвёртой главе приведены результаты исследования и разработки МЧСУ на грибовидном метаматериале, а именно: резонансных отрезков волноводов с магнитными стенками, содержащими элементарные ячейки одного или двух размеров, чувствительного элемента на грибовидной метаповерхности, волноводной согласованной нагрузки на грибовидном метаматериале. Также приведены результаты экспериментального исследования разработанного чувствительного элемента.

В заключении приведены основные результаты диссертационного исследования.

### **Личный вклад соискателя**

Личный вклад соискателя состоит в непосредственном участии в постановке задач исследования и их решении, разработке представленных в диссертационной работе компьютерных моделей устройств, проведении их численного расчета и анализа полученных результатов. Также автор лично изготовил макеты МЧСУ на грибовидном метаматериале и провел их экспериментальное исследование. При участии автора подготовлены основные публикации по выполненной работе.

### **Практическая значимость работы**

Основные результаты диссертации получены при выполнении инициативных работ в МИЭМ НИУ ВШЭ при участии соискателя, а также

выполнении трех двухлетних грантов Научного Фонда НИУ ВШЭ в составе НУГ «Электродинамика замедляющих систем и метаматериалов»:

1. Грант 17-05-0009, 2017-2018 гг.
2. Грант 19-04-005, 2019-2020 гг.
3. Грант 21-04-010, 2021-2022 гг.

В процессе работы над диссертационным исследованием были получены следующие результаты интеллектуальной деятельности:

1. Кухаренко А. С. Чувствительный элемент на метаматериале / А. С. Кухаренко, А. А. Елизаров, А. А. Скуридин, М. И. Закирова / Патент РФ на полезную модель № 170145. БИ № 11, 2017.
2. Елизаров А. А., Малинова О. Е., Сидорова Т. В., Скуридин А. А. МЕТА. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019613769 от 22.03.2019

Также результаты диссертационного исследования были использованы при выполнении проектов под руководством автора:

1. Студенческий проект МИЭМ №216, «Разработка нательных антенн и излучателей для интернета вещей», 2020-2022 гг.
2. Проект «Разработка нательных антенн и излучателей для интернета вещей» в рамках конкурса проектных групп НИУ ВШЭ (студенты и аспиранты), 2020-2021 гг.
3. Студенческий проект МИЭМ №841, «Исследование модулированных частотно-селективных поверхностей», 2021-2022 гг.

## **Основные результаты**

Основным итогом работы является решение актуальной задачи, заключающейся в исследовании электродинамических свойств структур на грибовидных метаматериалах и разработке новых микроволновых малогабаритных частотно-селективных устройств на их основе. Особенностью работы является её прикладная направленность, позволяющая

использовать полученные теоретические и экспериментальные результаты для решения конкретных научно-практических задач.

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Проведён обзор современного состояния и тенденций развития микроволновых частотно-селективных структур на метаматериалах. Рассмотрены их физические и конструктивные особенности, ограничения и возможности по расширению функционального назначения. Также рассмотрены и проанализированы численные методы расчёта электродинамических структур на метаматериалах и средства их компьютерного моделирования. Выявлено, что применение структур на метаматериалах в конструкциях микроволновых частотно-селективных устройств позволяет улучшить их характеристики и снизить габаритные размеры.
2. Предложены аналитические методы расчёта дисперсионных и фазовых характеристик электродинамических структур на грибовидном метаматериале:
  - Предложен аналитический метод расчёта резонансных и дисперсионных характеристик частотно-селективной поверхности на грибовидном метаматериале, основанный на зависимости частотных и дисперсионных характеристик от геометрических размеров и диэлектрического заполнения как отдельных ячеек, так и всей метаповерхности в целом, с помощью которого выявлено, что коэффициент замедления частотно-селективной поверхности на грибовидном метаматериале уменьшается в 7 раз при уменьшении размеров элементарных ячеек в 3 раза, а дисперсионная характеристика становится более линейной. Также выявлена прямая зависимость между относительной диэлектрической проницаемостью материала подложки грибовидного метаматериала и коэффициентом замедления структуры на нём, но при этом значение  $\epsilon$ , изменяющееся от 1 до 9,8, не оказывает влияния на характер дисперсионных кривых.

- Предложен геометрический метод определения сдвига фаз при синфазном отражении электромагнитных волн от конформных элементарных ячеек, образующих частотно-селективную метаповерхность. Метод основан на использовании закона Снеллиуса и элементарной геометрии для определения изменения угла отражения электромагнитной волны после изгиба планарных элементарных ячеек. Показано, что за счёт изгиба поверхности, падающая электромагнитная волна проходит дополнительный путь, что приводит к увеличению сдвига фазы отражённой волны.
3. Выполнен краткий обзор современных программных средств для моделирования электродинамических структур. Установлено, что для эффективного численного анализа и уточнения полученных ранее приближённо-аналитических моделей наиболее эффективно применять программные пакеты для полноволнового моделирования электродинамических структур.
  4. Результаты анализа и теоретического исследования нашли применение при проектировании и экспериментальном исследовании:
    - резонансного отрезка волновода с магнитной стенкой на грибовидном метаматериале, обладающего полосой режекции шириной не менее 500 МГц и затуханием не менее 15 дБ, расширение которой в 3,5 раза по сравнению с воздушным заполнением возможно путём подбора значения диэлектрической проницаемости подложки;
    - резонансного отрезка волновода с магнитной стенкой на грибовидном метаматериале, обладающего двумя полосами режекции за счёт использования модулированной структуры грибовидного метаматериала. Режекция наблюдается в диапазонах частот 4,4-4,7 ГГц и 5,3-6,5 ГГц при размерах ячеек метаматериала  $8 \times 8$  мм и  $4 \times 4$  мм. При нанесении слоя феррита на поверхность ячеек наблюдается сдвиг полос режекции в сторону более низких частот, величина которого

зависит от толщины напыления и значения его относительной магнитной проницаемости;

- согласованной волноводной нагрузки с торцевой стенкой на грибовидном метаматериале с КСВН от 1,13 до 1,15 в диапазоне 14,8-16,5 ГГц;
- чувствительного элемента на грибовидном метаматериале, предназначенный для контроля геометрических размеров, диэлектрической проницаемости и неоднородностей технологических сред. Чувствительность устройства к изменению относительной диэлектрической проницаемости исследуемого образца составляет 250 МГц/ед; к изменению толщины 210 МГц/мм. Экспериментальное исследование увеличенного макета данного чувствительного элемента подтвердило теоретические выводы о возможности осуществления с его помощью контроля геометрических параметров исследуемого образца. Погрешность между численными и экспериментальными результатами составила не более 4%.

### **Список опубликованных работ по теме диссертации**

Основные положения по теме диссертации изложены в 12 работах, опубликованных автором в изданиях, индексируемых в международных базах данных Scopus и Web of Science:

1. Rano D., Yelizarov A. A., Skuridin A. A., Zakirova E. A. Geometric Method for Determining the Phase Shift in the Reflection of an Electromagnetic Wave from a Conformal Meta-Surface of a Sensing Element // Meas. Tech. 2022. №65, pp. 273–278.
2. Yelizarov A. A., Skuridin A. A., Zakirova E. A. Simulation of Sensitive Element Found on Planar Mushroom-Shaped Metamaterial for Nondestructive Testing and Searching for Inhomogeneities in Technological Media // Meas. Tech. 2021. №63, pp. 828–833.

3. Skuridin A. Computer Simulation of Modulated Frequency Selective Surfaces on Mushroom-Shaped Metamaterials / Yelizarov (Elizarov) A. A., Nazarov I., Skuridin A., Zakirova E., Rano D. // Conf. Proceedings 2021 Systems of signals generating and processing in the field of on board communications. 2021. pp. 1-4.
4. Yelizarov A. A., Skuridin A. A., Nazarov I. V., Zakirova E. A. Simulation of a Frequency Selective Surface with Fractal Jerusalem Cross Unit Cells // Conf. Proceedings 2022 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing. 2022. pp. 4-4.
5. Yelizarov (Elizarov) A. A., Nazarov I., Skuridin A., Zakirova E. Waveguide Structures with Magnetic Walls on the Basis of the Mushroom-shaped Metamaterials /// Conf. Proceedings 2020 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE). 2020, pp. 175-179.
6. Skuridin A., Yelizarov (Elizarov) A. A., Nazarov I., Zakirova E. Investigation of Filtering and Sensing Properties of Complementary Metamaterial Resonant Cells by Computer Simulation // Journal of Physics: Conference Series. 2021. No. 1740. Article 012023.
7. Yelizarov (Elizarov) A. A., Nazarov I., Skuridin A., Zakirova E. Computer Model of a Frequency-Selective Surface on Mushroom-Shaped Metamaterial // Conf. Proceedings 2020 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications. 2020. pp. 1-4.
8. Yelizarov (Elizarov) A. A., Nazarov I., Skuridin A. Computer Simulations of Multiband Waveguide Filter on Modulated Metasurface // Conf. Proceedings 14th European Conference on Antennas and Propagation. 2020. pp. 1-4.
9. Yelizarov (Elizarov) A. A., Kukharenko A. S., Skuridin A. A. Metamaterial-based Sensor for Measurements of physical Quantities and Parameters of technological Processes // Conf. Proceedings 12th International Congress on Artificial Materials for Novel Wave Phenomena. 2018. pp. 448-450.
10. Skuridin A. A., Yelizarov (Elizarov) A. A., Kukharenko A. S. Millimeter-Wave Metamaterial-Based Sensor for Inhomogeneity Detection and

- Parameter Control of Technological Substances // Conf. Proceedings 2019 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications. 2019. pp. 1-4.
11. Yelizarov (Elizarov) A. A., Nazarov I., Skuridin A., Kukharenko A. S. Investigation of a rectangular waveguide with a magnetic wall made of mushroom-shaped metamaterial // Conf. Proceedings 18th International Vacuum Electronic Conference. 2017. pp. 1-3.
12. Yelizarov (Elizarov) A. A., Nazarov I., Kukharenko A. S., Skuridin A. A. Investigation of microwave sensor on the planar mushroom-shaped metamaterial // Conf. Proceedings 18th IEEE International Vacuum Electronic Conference. 2017. pp. 1-2.

### **Список цитируемой литературы**

- [1] Вендик И. Б., Вендик О. Г. Метаматериалы и их применение в технике сверхвысоких частот (обзор) / И. Б. Вендик, О. Г. Вендик // Журнал технической физики. – 2013. – Т. 83. – Вып.1. – С. 3-28.
- [2] Ijaz S. The Dawn of Metadevices: From Contemporary Designs to Exotic Applications / S. Ijaz, A. S. Rana, Z. Ahmad [et al.] // Advanced Devices & Instrumentation. – 2022. – Vol. 2022.
- [3] Miliadis C. Metamaterial-Inspired Antennas: A Review of the State of the Art and Future Design Challenges / C. Miliadis, R. B. Anderson, P. I. Lazaridis [et al.] // IEEE Access. – 2021. – Vol. 9. – pp. 89846-89865.
- [4] Panda P. K., Ghosh D. Isolation and gain enhancement of patch antennas using EMNZ superstrate / P. K. Panda, D. Ghosh // AEU-Int. J. Electron. Commun. – 2018. – Vol. 86. – pp. 164-170.
- [5] Chen T., Li S., Sun H. Metamaterials application in sensing / T. Chen, S. Li, H. Sun // Sensors. – 2012. – Vol. 12. – pp. 2742-2765.
- [6] Salim A., Lim S. Review of Recent Metamaterial Microfluidic Sensors / A. Salim, S. Lim // Sensors. – 2018. – Vol. 18. – Issue 1.
- [7] Елизаров А. А. Микроволновые частотно-селективные устройства на резонансных отрезках электродинамических замедляющих систем и структурах с метаматериалами / А. А. Елизаров, А. С. Кухаренко – М.: Издательский дом ВШЭ. – 2019. – 327 с.



- [8] Zhao X. Review on Metasurfaces: An Alternative Approach to Advanced Devices and Instruments / X. Zhao, Z. Sun, L. Zhang [et al.] // Advanced Devices & Instrumentation. – 2022. – Vol. 2022.
- [9] Sievenpiper D. High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band / D. Sievenpiper, L. Zhang, R. F. J. Broas [et al.] // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1999. – Vol. 47. – No. 11. – pp. 2059-2074.
- [10] Solymar L. Waves in metamaterials / L. Solymar, E. Shamonina. – Oxford: Oxford University Press. – 2009.