

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«КРЫМСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени В.И. Вернадского»**

на правах рукописи



БОЛДЫРЕВ НИКОЛАЙ АЛЕКСЕЕВИЧ

**ОСЛАБЛЕНИЕ ОТРАЖЕННОЙ СВЧ ВОЛНЫ СТРУКТУРОЙ
ПЛАНАРНОГО МЕТАМАТЕРИАЛА, СОДЕРЖАЩЕГО ТОНКИЕ
ПЛЕНКИ**

1.3.4. Радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Симферополь – 2026

Работа выполнена на кафедре радиофизики и электроники физико-технического института федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Крымский Федеральный университет им. В.И. Вернадского».

Научный доктор физико-математических наук, профессор
руководитель: Мазин Алим Сеит-Аметович

Официальные Донец Игорь Владимирович, доктор физико-
оппоненты: математических наук, доцент, федеральное
государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования «Южный
федеральный университет», профессор кафедры
«Общая физика».

Нещерет Анатолий Михайлович, доктор физико-
математических наук, Акционерное общество
«Самарское инновационное предприятие радиосистем»,
заместитель начальника научного отдела.

Защита состоится «24» сентября 2026 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета ЮФУ 801.01.19 в Южном федеральном университете по адресу: 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге, д.5, Южный федеральный университет, физический факультет, ауд. 318.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке им. Ю.А. Жданова Южного федерального университета по адресу: Ростов-на-Дону, ул. Зорге, д. 21 Ж и на сайте: <https://hub.sfedu.ru/diss/show/1350355/>

Автореферат разослан « » 2026 г.

Отзыв (в нем указывайте дату, а также полностью свои фамилию, имя, отчество, учёную степень со специальностью, звание, организацию, подразделение, должность, адрес, телефон, e-mail) с заверенной подписью рецензента и печатью учреждения просим направлять в 2 экз. ученому секретарю диссертационного совета ЮФУ 801.01.19 по адресу: 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге, д.5, физический факультет ЮФУ, а также в формате pdf– на e-mail: ds@sfedu.ru

Ученый секретарь
диссертационного совета ЮФУ 801.01.19



Корчагин В.И.

Актуальность темы

Разработка эффективных радиопоглощающих и рассеивающих покрытий является одной из ключевых задач современной радиофизики. Практическая потребность в подобных материалах обусловлена актуальностью в задачах снижения радиолокационной заметности объектов и экранирования радиоэлектронной аппаратуры от электромагнитных помех вплоть до создания безэховых измерительных камер и элементов антенных систем. Традиционные радиопоглощающие материалы (РПМ) на основе ферритовых и углеродных композитов позволяют выполнять поставленные практические задачи поглощения падающего электромагнитного излучения, однако обладают рядом существенных недостатков, проявляющихся в значительной толщине эффективного слоя, составляющего порядка четверти длины волны, большим значением удельной массой и узкой рабочей полосой частот, что существенно ограничивает применение подобных материалов в различных прикладных задачах. Иным подходом в решении таких задач является использование планарных метаповерхностей, являющихся сформированными периодическими структурами состоящих из резонаторов субволновых размеров, позволяющих манипулировать амплитудой, фазой и пространственным распределением отражённых электромагнитных волн за счет резонансного взаимодействия с элементами матрицы. Метаповерхности привлекают внимание исследователей благодаря малой толщине, технологичности изготовления и возможности перестройки рабочего диапазона путём изменения геометрии резонаторов. Тем не менее существенным недостатком чисто рассеивающих метаструктур является перераспределение энергии отражённой волны в боковые лепестки диаграммы рассеяния, а не её поглощение, что снижает эффективность подобных покрытий в задачах подавления обратного рассеяния.

Перспективным направлением, позволяющим преодолеть указанное ограничение, является комбинирование рассеивающих метаструктурных элементов с резистивными поглощающими слоями. В качестве таких слоёв

особый интерес представляют нанометровые металлодиэлектрические плёнки (МДС) с заданным поверхностным сопротивлением: благодаря субволновой толщине и технологической простоте нанесения они могут быть интегрированы в состав многослойного покрытия без существенного увеличения его толщины и массы. Вместе с тем закономерности взаимодействия электромагнитных волн К-диапазона (16–26 ГГц) с подобными комбинированными структурами, а также влияние резистивного слоя на формирование диаграммы обратного рассеяния метаповерхностей исследованы недостаточно.

Таким образом, разработка физических основ построения комбинированных ослабляющих покрытий, объединяющих рассеивающие планарные метаструктуры и поглощающие нанометровые плёнки, является актуальной научной задачей, имеющей как фундаментальное, так и прикладное значение.

Цель диссертационной работы - исследование электродинамических процессов взаимодействия СВЧ-волн К-диапазона с планарными метаструктурами и нанометровыми металлодиэлектрическими плёнками алюминия, выявление физических механизмов формирования диаграммы обратного рассеяния комбинированных структур и разработка на этой основе многослойного ослабляющего покрытия, обеспечивающего ослабление отражённой волны от проводящей поверхности в диапазоне 18-26 дБ в полосе частот 16-26 ГГц.

Задачи работы:

1. Провести анализ существующих методов формирования искусственных ослабляющих сред и радиофизических методик исследования их характеристик в СВЧ-диапазоне.
2. Установить влияние геометрических параметров единичных резонаторов и способа их взаимного расположения на частотные и поляризационные свойства сложносоставных метаструктур, обеспечивающих

ослабление нормальной составляющей отражённой электромагнитной волны в К-диапазоне.

3. Определить дифракционные коэффициенты $T(f)$, $R(f)$, $A(f)$ нанометровых плёнок алюминия в волноводном тракте и открытом пространстве в зависимости от толщины и поверхностного сопротивления, а также получить угловое распределение отражённых мощностей.

4. Исследовать частотные характеристики и диаграммы обратного рассеяния планарных метаповерхностей различной симметрии в диапазоне 16-25 ГГц, а также верифицировать полученные экспериментальные результаты компьютерной моделью.

5. Создать и экспериментально исследовать эффективность комбинированного ослабляющего покрытия на состоящих из двумерных метаструктур и алюминиевых пленок наноразмерной толщины, созданных для широкодиапазонного подавления отраженных ЭМВ от проводящих поверхностей.

6. Посредством компьютерного моделирования и экспериментальных измерений рассмотреть влияние дополнительного активного поглощающего слоя на формирование обратного фронта отраженной волны с целью минимизации нормальной составляющей при минимальном значении рассеиваемой мощности при углах отличных от нормали.

Научная новизна результатов:

1. Впервые реализовано комбинированное ослабляющее покрытие К-диапазона, включающее в себя рассеивающие планарные метапокрытия и резистивные нанометровые плёнки алюминия, а также экспериментально подтверждено преимущество данного покрытия над отдельными его элементами в задачах снижения величины отраженной мощности от проводящих объектов.

2. Теоретически обоснован и экспериментально подтверждён механизм фазового сдвига, реализующийся в сложносоставной метаповерхности из последовательных резонаторов с параллельным резистивным поглощающим

слоем и обеспечивающий ослабление нормальной составляющей отражённой волны вследствие деструктивной интерференции.

3. Установлено, что частотная характеристика двусоставных шахматных метаповерхностей является суперпозицией частотных свойств составляющих однонаправленных элементов, что позволяет детерминировано управлять полосой и глубиной ослабления путём изменения симметрии элементарной ячейки и их пространственной ориентации.

4. Показано, что добавление резистивного нанометрового слоя к рассеивающей метаструктуре позволяет не только дополнительно ослабить нормальную составляющую отражённой волны, но и подавить боковые лепестки диаграммы рассеяния на углах 20° и 51° .

Теоретическая значимость работы заключается в разработке электродинамических моделей планарных метаповерхностей, позволяющих эффективно детерминировать их частотные свойства и зависимость углового распределения отраженных от структуры волн в зависимости от значений частотных коэффициентов, результаты которых подтверждаются экспериментальными измерениями.

Практическая значимость работы:

1. Представленный в диссертационной работе метод добавления резистивного поглощающего слоя позволит повысить эффективность защитных метапокрытий путем минимизации боковых лепестков диаграммы рассеивания, а также дополнительно ослабить нормальную составляющую отраженной от проводящей поверхности ЭМВ.

2. Предложена оптимальная форма комбинированного ослабляющего покрытия К диапазона, состоящая из спиралевидных планарных метаструктур и поглощающих пленок алюминия, позволяющих ослаблять отраженную волну от -18 до -26 дБ.

Положения, выносимые на защиту:

1. Электродинамическая модель позволяющая рассчитывать частотные зависимости дифракционных коэффициентов рассеивающих планарных

метаповерхностей, распределение электромагнитных волн на поверхности структуры и диаграммы их рассеивания.

2. Бистатистический метод экспериментальных измерений угловых зависимостей позволил показать динамику изменения перераспределения пространственной отраженной мощности $P(\theta)$ от метаструктур различной формы в зависимости от значений дифракционных коэффициентов $T(f)$, $R(f)$, $A(f)$.

3. Применение блочного принципа построения метаструктуры из отдельных дипольных резонаторов позволяет добиться резонансного ослабления при различных типах линейной поляризации электрической компоненты поля и расширить частотный диапазон, в котором наблюдается рассеивания отраженной волны.

4. Показано, что частотная характеристика коэффициента $T(f)$ двусоставных шахматных структур является суперпозицией частотных свойств элементов, входящих в ее состав, что позволяет детерминировать свойства двусоставной метаповерхности от их пространственной ориентации, симметрии расположения ячеек и подстраивать их под конкретный диапазон и необходимую физическую задачу.

5. Применение тонкопленочных проводящих структур как элемента активных потерь поглощающего слоя в комбинациях с метаповерхностями позволили уменьшить уровень отраженной волны как в строго нормальном, так и отличном от нормали направлениях.

Обоснованность и достоверность результатов исследования подтверждается комплексным подходом к проведению натурных исследований, опирающихся на применение современных высокоточных аппаратно-программных комплексов и измерительной методологической базы. Теоретические выводы, полученные путем компьютерного электродинамического моделирования в специальных ПО, строго верифицированы результатами натурных испытаний. Кроме того, научные

положения автора прошли независимую экспертную оценку: материалы диссертации опубликованы в рецензируемых периодических изданиях входящих в перечень ВАК РФ и международную базу Scopus по профилю 1.3.4 Радиофизика, а также обсуждались на профильных научных конференциях.

Апробация работы. Ключевые аспекты и промежуточные итоги диссертационного исследования были представлены научному сообществу, прошли публичное обсуждение и отражены в материалах 7 научно-практических конференций. В их числе:

- Радиолокация, навигация, связь. Сборник трудов XXVIII Международной научно-технической конференции, посвященной памяти Б.Я. Осипова. Воронеж, 2022 год;
- 33 Международной крымской конференции «СВЧ-техники и телекоммуникационных технологий». Севастополь, 2023;
- Радиолокация, навигация, связь. Сборник трудов XXIX Международной научно-технической конференции, посвященной 70-летию кафедры радиофизики ВГУ. В 5-ти томах. Воронеж, 2023г;
- Международная научная конференция «Излучение и рассеяние электромагнитных волн» RSEMW 2023. п. Дивноморское, 2023г;
- Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами: Сборник статей одиннадцатой Всероссийской научной школы-семинара, Саратов, 22 мая 2024 года;
- 34 Международной крымской конференции «СВЧ-техники и телекоммуникационных технологий». Севастополь, 2024;
- Радиолокация, навигация, связь. Сборник трудов XXX Международной научно-технической конференции. В 5-ти томах, Воронеж, 2024 год.

Личное участие автора. Соискателем самостоятельно выполнен комплекс исследований характеристик рассеяния комбинированного покрытия и его отдельных компонентов с использованием волноводных

трактов и методов измерения в открытом пространстве. Для анализа радиофизических эффектов в двумерных метаматериалах и поглощающих пленочных структурах, автором была разработана и практически реализована бистатическая измерительная система. Автор лично предложил и разработал структуру комбинированного покрытия, позволяющего проводить одновременное рассеивание и поглощение ЭМВ СВЧ-диапазона, создал корректную модель для расчета частотных и рассеивающих свойств подобных структур при их взаимодействии волн К-диапазона.

Соответствие диссертационной работы паспорту специальности.

Тематика диссертационного исследования соответствует требованиям паспорта специальности 1.3.4. Радиофизика, а именно области: «Изучение линейных и нелинейных процессов излучения, распространения, дифракции, рассеяния, взаимодействия и трансформации волн в естественных и искусственных средах». Соответствие данному пункту подтверждается тем, что в работе детально рассматриваются механизмы волнового взаимодействия в метаматериалах, а также проводится анализ спектральных характеристик созданных комбинированных покрытий и составных элементов при их размещении в свободном пространстве и волноводных системах.

Публикации. По теме диссертационного исследования издано 9 журнальных публикаций. Из них 2 статьи вышли в изданиях, реферируемых международными базами Scopus и Web of Science, а 7 работ размещены в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК. Ключевые положения и результаты работы прошли апробацию в виде 7 докладов на научных конференциях и симпозиумах всероссийского и международного уровней.

Связь работы с научными программами: Исследования в рамках данной диссертационной работы были реализованы при финансовой поддержке со стороны Российского научного фонда: грантов № 22-22-20126 и № 25-22-00261).

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы. Работа содержит 120 страниц, 82 рисунка, 3 таблицы. Список литературы включает 101 наименование.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы, указаны основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе анализируются современные подходы к созданию и исследованию свойств радиопоглощающих материалов СВЧ диапазона. Установлено, что наиболее перспективным направлением является комбинирование резонансных метаповерхностей с активными поглощающими слоями, позволяющее достичь одновременного уменьшения толщины покрытия и расширения рабочей полосы частот. Рассмотрены преимущества численного моделирования (CST, HFSS) для теоретического исследования свойств подобных структур перед аналитическими методами при проектировании сложносоставных метаструктур, появляющихся вследствие существенных ограничений применимости к сложным геометриям и сильным межэлементным взаимодействиям. Также обоснована необходимость интеграции расчетных и экспериментальных исследований в рамках единой научной работы.

Вторая глава посвящена описанию экспериментальных методик исследования частотных характеристик метаповерхностей [1] и нанометровых проводящих плёнок [2] в волноводном тракте и открытом пространстве.

Основным экспериментальным методом исследования выступал бистатический метод измерения угловых зависимостей рассеянного поля, позволяющий получить пространственное распределение мощности отражённой волны при последовательном перемещении приёмной антенны по полярному углу θ с шагом 5° при фиксированном азимутальном угле $\varphi = 0^\circ$.

Выбор данного метода обусловлен тем, что рассеивающие метаповерхности перераспределяют энергию отражённой волны в

пространстве, формируя боковые лепестки, полная картина которых не может быть получена при моностатическом измерении.

Для количественной оценки взаимодействия электромагнитной волны с исследуемыми структурами использовались три дифракционных коэффициента. Коэффициент прохождения $T(f)$ определялся как отношение мощности, детектируемой приёмной антенной при наличии образца на пути волны, к мощности в отсутствие образца (нормировка на свободное пространство):

$$T(f) = \frac{P(f)_{\text{прош}}}{P(f)_{\text{пад}}}.$$

Коэффициент отражения $R(f)$ определялся как отношение мощности, отражённой от исследуемого образца, к мощности, отражённой от металлического зеркала идентичной площади:

$$R(f) = \frac{P(f)_{\text{отр}}}{P(f)_{\text{зерк}}}.$$

Коэффициент поглощения $A(f)$ рассчитывался из условия сохранения энергии:

$$A(f) = 1 - T(f) - R(f).$$

Шаг сканирования по частоте составлял $\Delta f = 0,1$ ГГц во всём рабочем диапазоне 16-25 ГГц. Факт полного перекрытия образцом излученной волны подтверждался предварительными измерениями эталонного образца, при которых выполнялось условие $T(f) = 0$, что и свидетельствовало о соблюдении данного условия.

Для оценки ослабляющей способности метаповерхности относительно эталонного отражателя использовался коэффициент изменения основного лепестка $K_{\text{осн}}$, нормированный на эталонный отражатель:

$$K_{\text{осн}} = \frac{P_m}{P_{pl}},$$

где P_m - мощность, пришедшая на приемник от исследуемой структуры при угле падения 0° , P_{pl} - мощность, пришедшая на приемник от металлического зеркала при угле падения 0° .

Разработанная измерительная установка для бистатистического исследования диаграмм обратного рассеивания образцов метаповерхностей позволил рассмотреть их полную картину углового распределения рассеянного электромагнитного поля и частотных зависимостей, что позволило связать между собой геометрические параметры резонаторов метаструктур с их рассеивающими свойствами, а также количественно оценить вклад в ослабление величины обратного рассеивания при добавлении поглощающего слоя наноразмерной пленки на поверхность планарной метаповерхности.

В третьей главе представлены результаты экспериментального исследования частотных и рассеивающих угловых характеристик планарных метаповерхностей различной симметрии в диапазоне 16-25 ГГц. Исследованы однонаправленные и шахматные симметрии метаструктур, в которых в качестве резонатор использовались полосы [3,4].

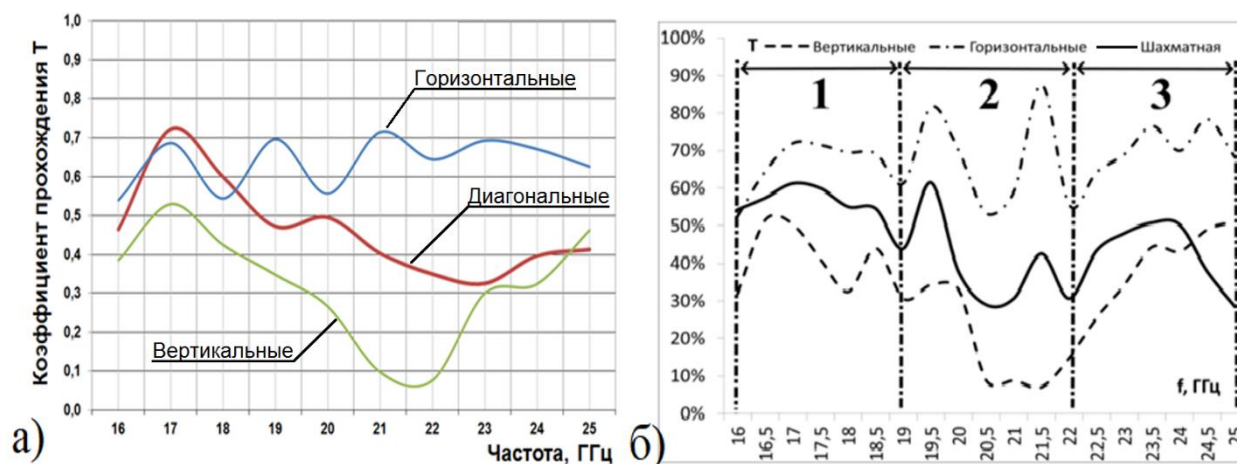


Рис.1 Частотная зависимость коэффициента прохождения $T(f)$ для различных ориентаций полосковых элементов: а) диагональные, вертикальные, горизонтальные; б) двунаправленных шахматных структур

Полученные экспериментальные зависимости величины коэффициента прохождения $T(f)$ (рис. 1, а) демонстрируют выраженный резонансный характер. Также было получено, что изменение пространственной ориентации проводящих элементов существенно изменяет положение резонансных минимумов и характер частотных характеристик.

Было показано, что использование двунаправленных метаповерхностей, построенных по шахматному типу, демонстрируют частотную характеристику, являющуюся суперпозицией свойств входящих в ее состав элементов ячеек (рис.1, б). Таким образом можно утверждать, что изменение составных ячеек итоговой поверхности позволяет полосу рабочих частот и контролировать положение резонансного минимума [5].

Для установления связи частотных свойств с пространственным перераспределением отражённой энергии выполнены измерения диаграмм обратного рассеяния.

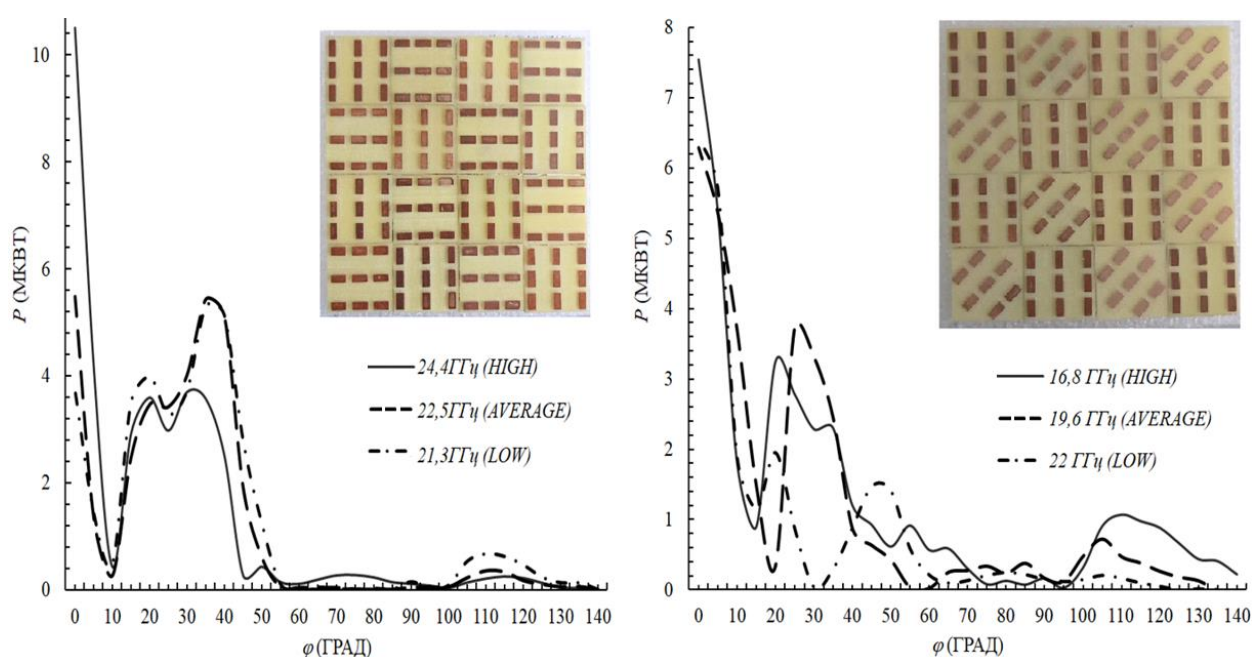


Рис. 2 Диаграммы рассеивания различных комбинаций двунаправленных метаповерхностей, полученных на характерных частотах

Показано, что величина нормальной составляющей отражённой волны ($\theta = 0^\circ$) коррелирует со значением коэффициента прохождения $T(f)$: уменьшение $T(f)$ сопровождается снижением отражённой мощности в обратном направлении и одновременным ростом уровня боковых лепестков. (рис.2). Для количественной оценки ослабления введён относительный коэффициент изменения основного лепестка $K_{осн}$. В резонансных точках значение $K_{осн}$ в резонансных точках снижалось до 0,25-0,35 относительно металлического зеркала. Экспериментально установлено, что шахматные

структуры обеспечивают ослабление нормальной составляющей до 70-80% в диапазоне 20,5-21,5 ГГц.

Для интерпретации экспериментальных данных проведено электродинамическое моделирование в среде CST Studio. Расчёты показали (рис. 3), что при частоте 21,3 ГГц напряжённость отражённого поля в нормальном направлении для метаструктуры составляет около 2 В, тогда как для металлического зеркала аналогичной площади - порядка 70 В.

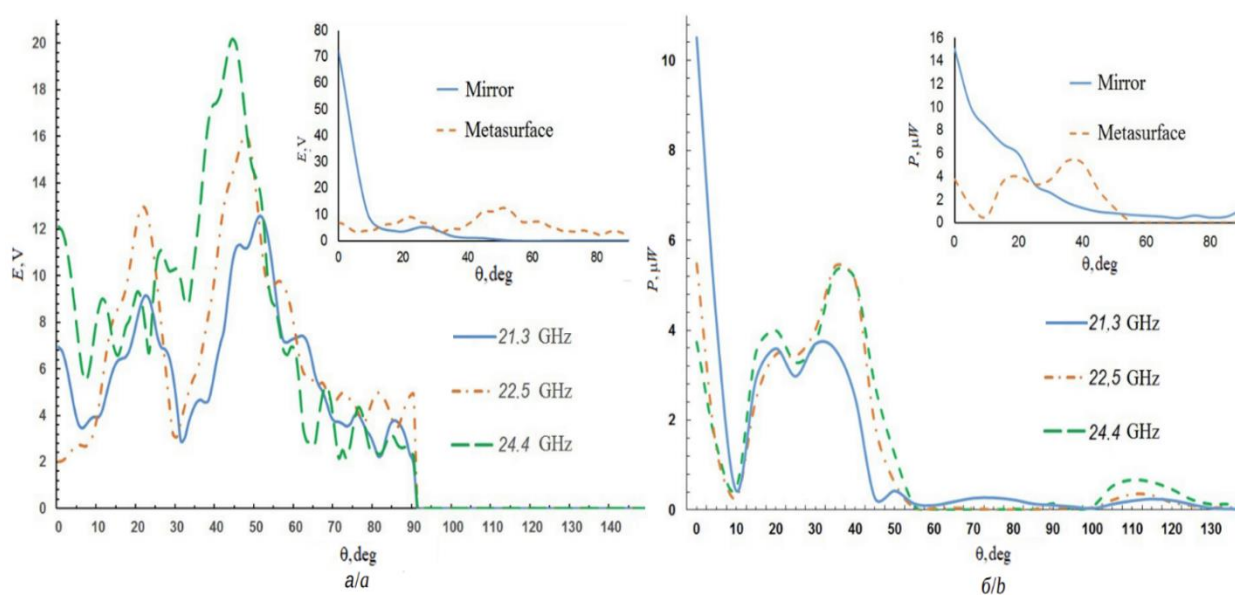


Рис. 3 Диаграмма рассеяния метаповерхности состоящей из сонаправленных и ортогональных элементов: а - модель, б - эксперимент. Вставка: сравнительные диаграммы рассеивания $E(\theta)$ метаповерхности расположенном на металлическом зеркале, относительно эталона

Дополнительно исследованы структуры на основе спиральных треугольных резонаторов [6,7]. Частотная характеристика (рис. 4) демонстрирует формирование до пяти резонансных минимумов в диапазоне 16-25 ГГц.

Полученная в процессе компьютерного моделирования зависимость величины коэффициента ослабления $A(f)$ спиралевидной метаповерхности от частоты падающего по нормали электромагнитного излучения показала наличие характерных пиков, имеющих периодический характер (рис. 4).

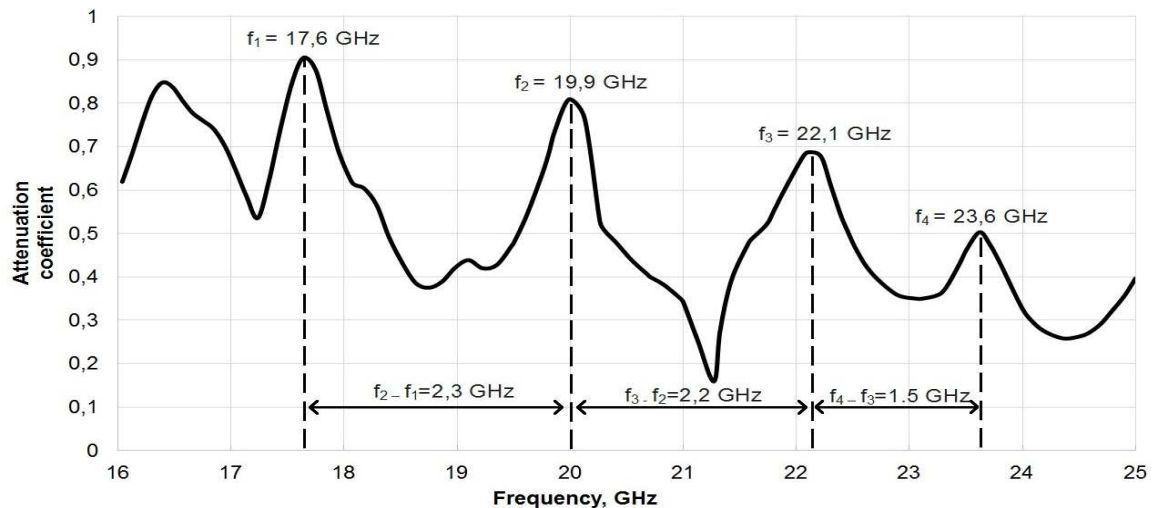


Рис. 4 Результат численного моделирования частотной характеристики спиралевидной треугольной метаструктуры

Наибольшее значение коэффициента было получено на частоте $f_1 = 17,6$ ГГц и составляет $A(f) = 0,9$. Поведение последующих пиков $f_2 = 19,9$ ГГц, $f_3 = 22,1$ ГГц, $f_4 = 23,6$ ГГц, наблюдающихся при увеличении частоты падающего излучения, характеризуется уменьшением величины значения коэффициента ослабления $A(f)$.

Для выявления физического механизма ослабления проведён анализ распределения поверхностных токов в различных фазах колебаний (рис. 5).

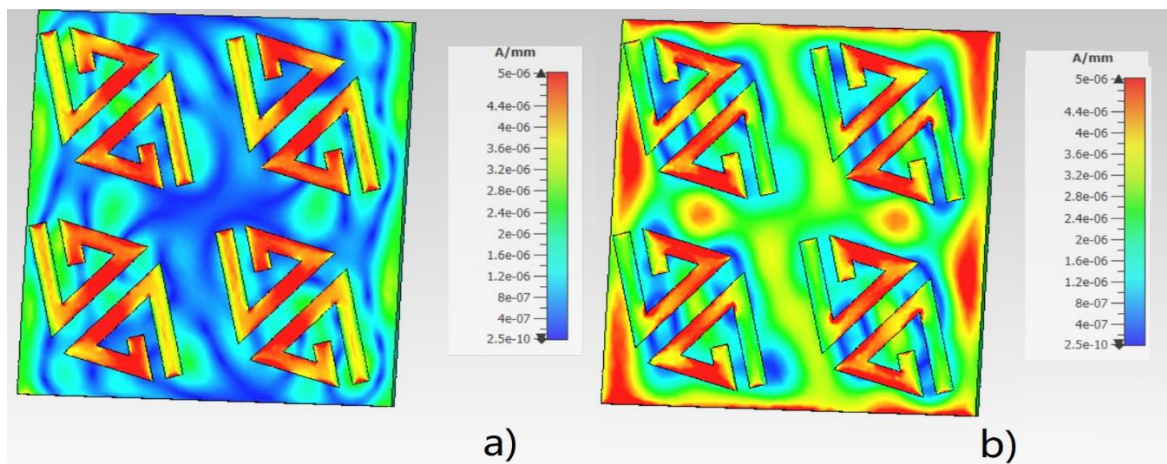


Рис. 5 Распределение поверхностных токов на спиральной треугольной метаструктуре в фазах в CST Studio

Из полученных результатов видно, что падающая волна с вертикальной поляризацией наводит токи на поверхности резонаторов, направление которых располагается параллельно вектору поляризации, после чего, в процессе протекания этих токов наблюдается рост величины поля

заключенном в пространстве между резонаторами, сопровождающийся формированием пространственных максимумов и минимумов поля (рис 5, а). После чего при значениях фазы волны равным 90° амплитуда наведенных токов на резонаторах начинает затухать, что является следствием процесса переизлучения накопленной энергии (рис 5, б). Описанный физический процесс отвечает за угловое рассеяние обратного фронта отражённой волны и величину отраженного поля, реализующееся вследствие интерференционного наложения сгенерированных электромагнитных волн как в межэлементном пространстве, так и в зазоре между резонаторными элементами метаповерхности и металлическим экраном.

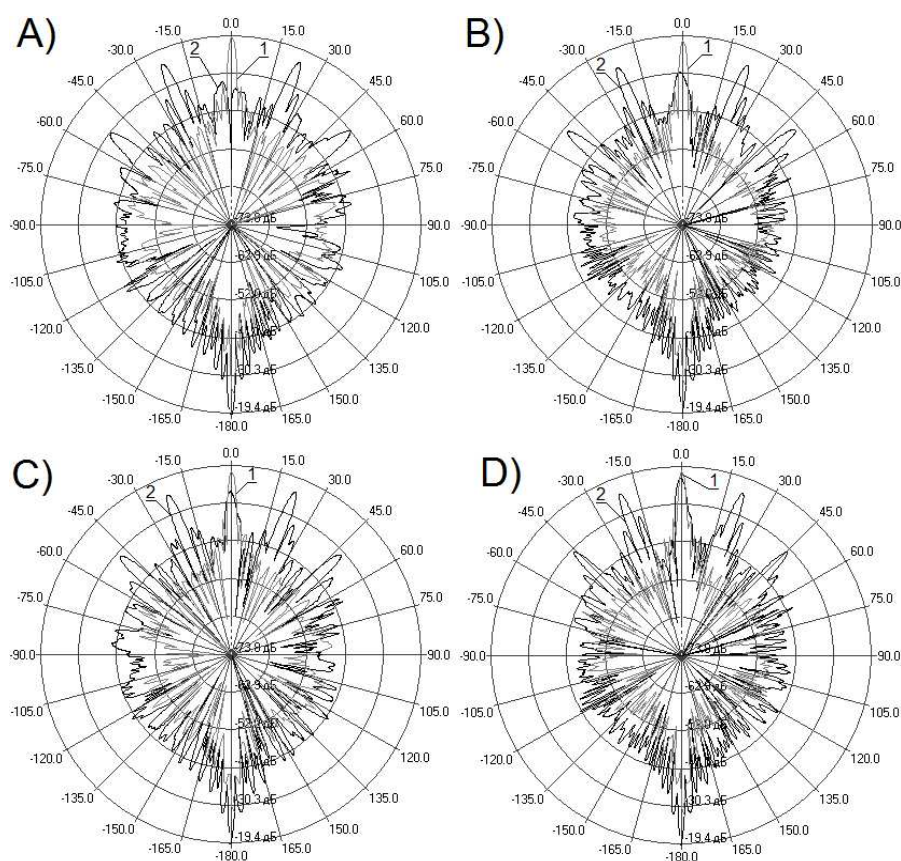


Рис.6 Диаграммы обратного рассеяния метаповерхности на частоте: а) 19.2 ГГц, б) 19.7 ГГц, с) 20.4 ГГц, d) 21.2 ГГц (1 - эталон, 2 - метаповерхность)

Полученные квазимоностатическим методом диаграммы обратного рассеяния спиральной метаповерхности на различных частотах (рис. 6) подтверждают её широкополосные свойства в задачах ослабления величины отраженной волны при не угловом падении.

В четвертой главе представлены результаты исследования нанометровых алюминиевых плёнок как элементов активного поглощения, а также разработка и экспериментальная верификация комбинированных ослабляющих покрытий на основе метаструктур и резистивных плёнок. Проведено исследование поглощающих свойств наноразмерных пленочных структур с толщиной металлизации 1-10 нм, нанесенных на диэлектрические подложки, в волноводном тракте и открытом пространстве.

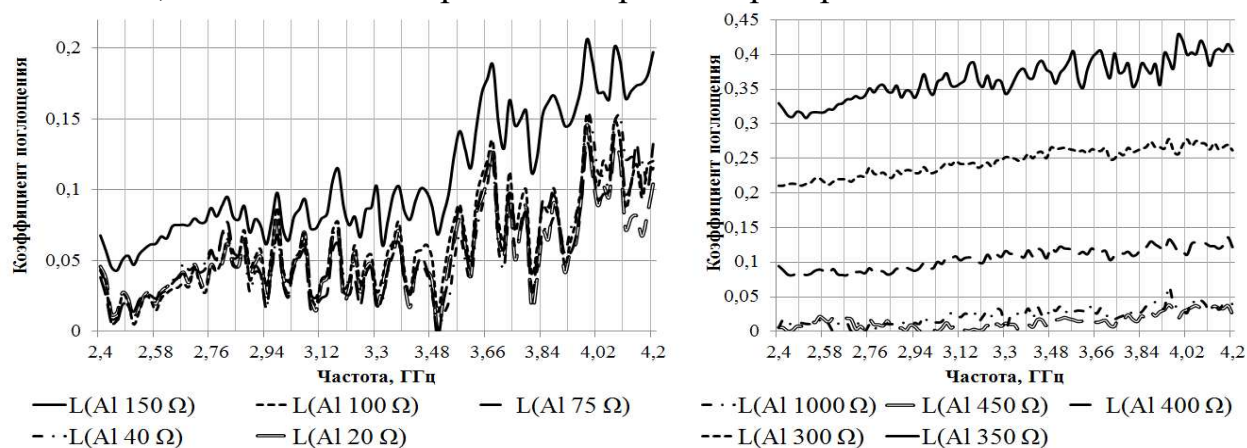


Рис. 7 Коэффициент поглощения для металлических пленок в зависимости от значения их поверхностного сопротивления

Экспериментально установлено, что наивысший показатель поглощения электромагнитной волны наблюдается при толщинах напыления проводящего слоя 5-7 нм и равняется 25% при достижении поверхностного сопротивления образцов равным 300-400 Ом (рис. 7). Наличие максимума обусловлено тем, что при малых толщинах формирование плёнки происходит в виде отдельных островковых преципитатов, не имеющих между собой прямой гальванической связи, что обеспечивает резистивные потери. Моделированием динамики изменения поверхностной плотности тока в предложенной островковой модели установлены особенности деградиационных явлений при воздействии мощных СВЧ-полей [8].

Результаты исследований позволили разработать комбинированное покрытие, объединяющее два основных физических принципа ослабления волны: рассеяние (метаструктуры) и поглощение (нанометровые плёнки).

Структура состоит из металлического зеркала, на котором через диэлектрический слой расположена планарная метаструктура, а поверх неё через диэлектрический слой - матрица поглощающих нанометровых плёнок алюминия толщиной 5 нм. Угловое распределение мощностей, полученное

бистатистическим методом, показывает влияние каждого компонента на формирование обратного фронта волны.

Угловое распределение мощностей, полученное бистатистическим методом (рис. 8), показывает влияние каждого компонента на формирование обратного фронта волны [9,10].

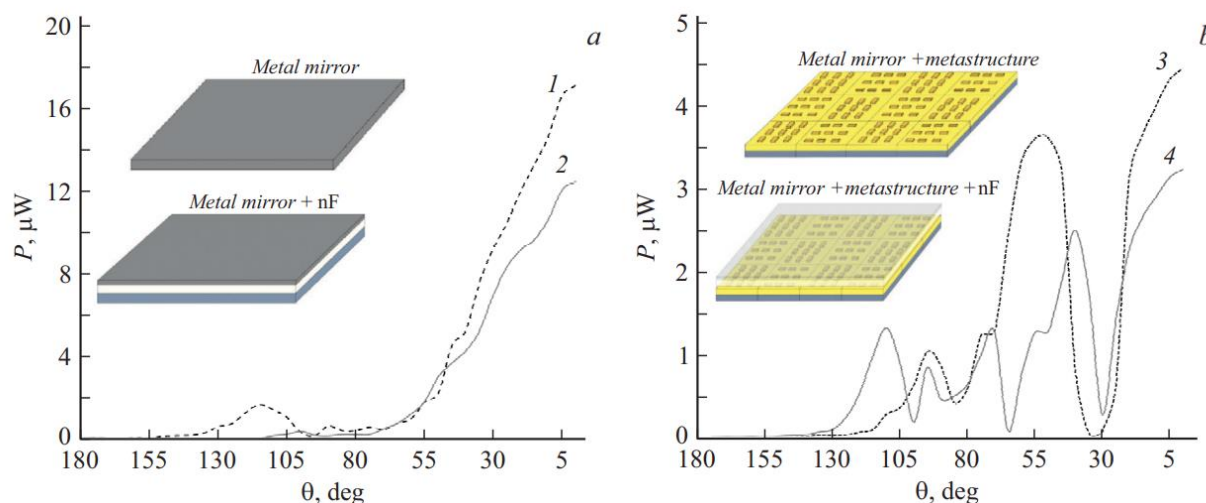


Рис. 8 Угловое распределение мощностей исследуемых образцов

Было установлено, что при расположении нанометровых плёнок на зеркале (рис.8, кривая 2) форма диаграммы практически не изменяется по сравнению с зеркалом, однако наблюдается количественное ослабление в диапазоне углов $\theta = [0-50^\circ]$. Величина отражённой волны при $\theta = 0^\circ$ снижается на 4 мкВт (около 25%). При использовании исключительно метаструктуры, расположенной на зеркале (рис. 8, кривая 3) картина распределения поля значительно меняется. Основной лепесток ($\theta = 0^\circ$) ослабляется на 11 мкВт относительно зеркала. Формируется боковой лепесток амплитудой $\sim 3,5$ мкВт в диапазоне углов $\theta = [30-85^\circ]$ с максимумом при $\theta = 55^\circ$. В случае использования комбинированного покрытия (рис.8, кривая 4) наблюдается дополнительное ослабление амплитуды отражённой мощности на всём участке диаграммы. Основной лепесток дополнительно ослабляется на 1,5 мкВт, боковой лепесток уменьшается на 1 мкВт и делится на два максимума.

Для итоговой верификации разработанного комбинированного покрытия проведены измерения в безэховой камере квазимоностатическим методом [11,12]. Частотная зависимость отражённой мощности при нормальном падении представлена на рис. 9.

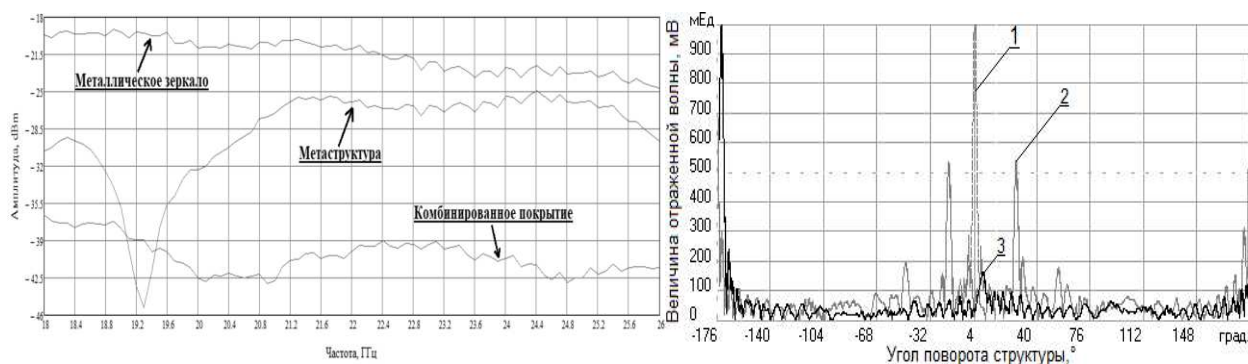


Рис. 9 Экспериментальные характеристики комбинированного покрытия, измеренные в безэховой камере

Измерения показали, что величина ослабления на всём частотном участке 18-26 ГГц составляет от 18 до 26 дБ (рис.9, а). Диаграммы рассеяния в зависимости от угла падения подтвердили, что добавление тонкоплёночных поверхностей значительно ослабляет отражённую волну при различных углах падения, а также практически зануляет боковые лепестки на углах 20° и 51° , полученные при измерении метаповерхностей без них (рис.9, б).

Заключение и основные выводы диссертационной работы:

В диссертационной работе проведено комплексное экспериментальное и численное исследование планарных метаповерхностей и нанометровых металлодиэлектрических плёнок алюминия как элементов ослабляющих покрытий СВЧ-диапазона. На основе полученных результатов разработано и верифицировано комбинированное покрытие, обеспечивающее широкополосное подавление отражённой волны от проводящей поверхности в К-диапазоне.

Основные результаты и выводы:

1. Проведён анализ существующих методов формирования радиопоглощающих покрытий. Показано, что комбинирование рассеивающих метаструктур с резистивными поглощающими слоями является перспективным направлением, позволяющим преодолеть ограничения как традиционных РПМ, так и чисто рассеивающих метаповерхностей.
2. Установлено, что геометрия и симметрия элементарных ячеек метаповерхностей определяют положение и ширину полос резонансного ослабления. Шахматное расположение разноориентированных резонаторов

обеспечивает ослабление нормальной составляющей отражённой волны до 70-80% в диапазоне 20,5-21,5 ГГц.

3. Показано, что частотная характеристика двусоставных шахматных метаповерхностей является суперпозицией частотных свойств составляющих однонаправленных элементов, что позволяет детерминировано управлять полосой и глубиной ослабления путём изменения симметрии элементарной ячейки и их пространственной ориентации.

4. Спиралевидные треугольные резонаторы способны формировать до пяти резонансных минимумов в диапазоне 16-25 ГГц, обеспечивая широкополосное ослабление при нормальном падении.

5. Разработано и экспериментально верифицировано комбинированное покрытие, состоящее из планарных метаструктур с резонаторами выполненных в виде спиралевидных треугольников и наноразмерных плёнок алюминия с толщиной напыления проводящего слоя - 5 нм. Проведенные измерения в безэховой камере позволили продемонстрировать ослабление отражённой волны на 18-26 дБ в полосе частот 18-26 ГГц при одновременном подавлении боковых лепестков диаграммы рассеяния, проявляющихся при углах падения волны 20° и 51° , вызванных аномальным преломлением волны структурой метаматериала.

Полученные результаты показывают, что комбинирование рассеивающих метаструктур с резистивными нанометровыми плёнками является эффективным подходом к созданию малоразмерных широкополосных ослабляющих покрытий К-диапазона. Разработанный принцип построения комбинированных покрытий может быть использован при создании средств снижения радиолокационной заметности объектов, экранирующих покрытий и безэховых измерительных камер.

Публикации по теме диссертации

1. Экспериментальное исследование электродинамических параметров малоотражающей спиралевидной метаструктуры в диапазоне 2,4 - 4,2 ГГц / Н. А. Болдырев, В. М. Васильченко, Д. А. Полетаев [и др.] // Радиолокация, навигация, связь : сборник трудов XXX Международной научно-технической конференции (г. Воронеж, 16–18 апреля 2024 г.) : в 5 томах. Т. 4 / Министерство науки и высшего образования РФ, Федеральное

государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Воронежский государственный университет", Физический факультет, АО "Концерн "Созвездие"". – Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2024. – С. 335-338. – EDN BAAEIF

2. Сравнение электродинамических свойств, проводящих металлизированных и углеродных наноструктурных пленок / Н. А. Болдырев, Д. В. Косов, В. В. Нечунаев [и др.] // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. – 2025. – Т. 8, № 1. – С. 45-58. – DOI 10.21227/chf3-7c62. – EDN QSBWIG.

3. Влияние пространственной ориентации проводящих элементов составной метаповерхности на их частотные характеристики и диаграммы рассеивания в СВЧ-диапазоне / А. С. Мазинов, И. Ш. Фитаев, Н. А. Болдырев // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2022. – Т. 18, № 4. – С. 86-90. – DOI 10.36622/VSTU.2022.18.4.012. – EDN IQKJZK. K2

4. Моделирование рассеивающих свойств блочных метаповерхностей в диапазоне 16-25 ГГц и сравнение с экспериментальными результатами / А. С. А. Мазинов, М. М. Падалинский, Н. А. Болдырев, А. В. Старосек // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. – 2023. – Т. 23, № 2. – С. 102-111. – DOI 10.18500/1817-3020-2023-23-2-102-111. – EDN SXWPVG. K2

5. Формирование частотных характеристик радиопрозрачности метаповерхности в СВЧ диапазоне / И. Ш. Фитаев, Н. А. Болдырев, И. В. Юрась [и др.] // Радиолокация, навигация, связь : сборник трудов XXVIII Международной научно-технической конференции, посвященной памяти Б. Я. Осипова (г. Воронеж, 27-29 сентября 2022 г.) : в 6 томах. Т. 5 / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Воронежский государственный университет", Физический факультет, АО "Концерн "Созвездие"". – Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2022. – С. 291-299. – EDN XGLYYF.

6. Возможности ослабления основного лепестка отраженной волны посредством спиралевидной треугольной метаструктуры / Н. А. Болдырев, И. Ш. Фитаев, М. М. Падалинский [и др.] // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2024. – Т. 20, № 2. – С. 116-123. – DOI 10.36622/1729-6501.2024.20.2.018. – EDN BKLSXZ. K2.

7. Частотные зависимости и диаграммы рассеяния комбинированных металлодиэлектрических поверхностей в диапазоне 16-25 ГГц / А. С. А. Мазинов, Н. А. Болдырев, М. М. Падалинский [и др.] // Известия Саратовского

университета. Новая серия. Серия: Физика. – 2025. – Т. 25, № 1. – С. 12-23. – DOI 10.18500/1817-3020-2025-25-1-12-23. – EDN FAAPBH. K2

8. Формирование металлodieлектрических структур с нанометровыми проводящими пленками и исследование их нагрева при воздействии СВЧ-полей / Е. В. Григорьев, С. П. Арсеничев, А. В. Старосек, И. Ш. Фитаев, Н. А. Болдырев // Прикладная физика. – 2022. – № 4. – С. 64–69. – DOI: 10.51368/1996-0948-2022-4-64-69. – EDN RTIUKB. K2

9. Мазинов, А. С. Ослабление нормальной составляющей отраженной электромагнитной волны комбинированными радиопоглощающими покрытиями / А. С. Мазинов, И. Ш. Фитаев, Н. А. Болдырев // Письма в Журнал технической физики. – 2022. – Т. 48, № 19. – С. 27-30. – DOI 10.21883/PJTF.2022.19.53592.19324. – EDN IWZKVA. [*Переводная версия: Mazinov A S. Attenuation of the normal component of the reflected electromagnetic wave by combined radio-absorbing coatings / Mazinov A S, Fitaev I Sh, Boldyrev N A // Technical Physics Letters. – 2022. – Vol. 48, No. 10. – P. 24. – DOI 10.21883/tpl.2022.10.54792.19324. – EDN YTVIGY*]. K1

10. Investigation of the Attenuation Properties of a Compact Absorber Based on a Metamaterial and a Nanometer Conductive Film / A. S. A. Mazinov, N. A. Boldyrev, M. M. Padalinsky, A. V. Starosek // Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW), Divnomorskoe, Krasnodar Region, Russia, June 26–30, 2023. – IEEE, 2023. – P. 304-307. – DOI 10.1109/RSEMW58451.2023.10202152. – EDN QDXTWR.

11. Ослабление отраженной СВЧ-волны структурой планарного метаматериала при добавлении активного поглощающего тонкопленочного слоя / А. С. Мазинов, Н. А. Болдырев, В. М. Васильченко, А. В. Старосек // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2024. – Т. 29, № 6. – С. 64-69. – DOI 10.18127/j5604128-202406-08. – EDN EKCVYY. K2

12. Рассеивающие и частотные свойства метаповерхности с треугольными спиралевидными резонаторами в комбинации с тонкими проводящими пленками / А. С. Мазинов, Н. А. Болдырев, М. М. Падалинский [и др.] // Журнал радиоэлектроники. – 2026. – № 1. – DOI 10.30898/1684-1719.2026.1.1. – EDN OUUXGH. K1