

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА
доктора физико-математических наук
Нещерета Анатолия Михайловича
на диссертацию Болдырева Николая Алексеевича
«Ослабление отраженной СВЧ волны структурой планарного
метаматериала, содержащего тонкие пленки»,
представленную на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук по специальности 1.3.4. Радиофизика

Общие положения

На отзыв официального оппонента были представлены материалы в составе:

- диссертация на 119 листах;
- автореферат (брошюра);

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений, списка литературы (102 наименования).

Актуальность темы диссертационного исследования

Диссертационная работа посвящена исследованию процессов взаимодействия электромагнитных волн СВЧ-диапазона (К-диапазон) с планарными метаповерхностями, нанометровыми металлодиэлектрическими пленками алюминия и комбинированными структурами, объединяющими рассеивающих и поглощающий механизмы ослабления отраженного излучения.

Актуальность темы автор связывает с необходимостью создания малогабаритных радиопоглощающих и рассеивающих покрытий для снижения радиолокационной заметности, электромагнитного экранирования, построения безэховых камер и совершенствования антенных систем. В работе обоснованно отмечаются ограничения традиционных ферритовых и углеродных поглотителей: значительная толщина, масса и ограниченная рабочая полоса. Одновременно показан недостаток чисто рассеивающих метаповерхностей, заключающийся не в устранении отраженной энергии, а в ее перераспределении в боковые направления. На этом основании предложено объединение планарной метаструктуры с резистивным нанометровым слоем.

Тема диссертации является важной как в фундаментальном, так и в прикладном отношении. Задача управления пространственным распределением отраженного электромагнитного поля, особенно при одновременном уменьшении толщины и массы покрытия, относится к востребованным направлениям современной радиофизики.

Заслуживает положительной оценки то, что автор не ограничивается исследованием коэффициента отражения по нормали, а рассматривает угло-

вое распределение энергии. Это принципиально важно для метаповерхностей: снижение главного лепестка само по себе не означает уменьшения полной отраженной энергии, поскольку энергия может быть перенаправлена в боковые лепестки. В работе указанная проблема не только выявляется, но и используется как основание для создания комбинированного покрытия.

Актуальность усиливается ориентацией исследования на К-диапазон, в котором геометрические размеры резонансных элементов позволяют создавать компактные периодические структуры и одновременно предъявляют повышенные требования к точности изготовления и измерений.

Таким образом, тема диссертационной работы, связанная с исследованием ослабления отраженной СВЧ волны структурой планарного метаматериала, содержащего тонкие пленки, является безусловно актуальной.

Целью диссертационной работы является процесс взаимодействия СВЧ исследование электродинамических 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.

По своему замыслу работа представляет собой последовательный цикл исследований:

- анализ существующих радиопоглощающих и рассеивающих покрытий;
- разработка методик измерения;
- исследование простых и сложносоставных метаповерхностей;
- исследование тонких алюминиевых пленок;
- объединение рассеивающего и поглощающего элементов;
- экспериментальная проверка комбинированного покрытия в безэховой камере.

Такая логика построения представляется обоснованной и соответствует поставленной цели.

Содержание и оформление диссертации

Содержание диссертационной работы, в основном, возражений не вызывает.

В *первой главе* приведен обзор существующих методов ослабления СВЧ-излучения, экспериментальных способов исследования радиопоглоща-

ющих материалов и численных методов электродинамического моделирования.

К достоинствам главы следует отнести рассмотрение:

- поглощающих, рассеивающих, интерференционных и комбинированных покрытий;
- волноводных, квазиоптических и резонансных методов измерения;
- программных пакетов CST Studio и Ansys HFSS;
- методов конечных разностей, конечного интегрирования и конечных элементов.

Приведено обоснование необходимости интеграции теоретических и экспериментальных исследований в рамках единой научной работы.

Во *второй главе* описаны экспериментальные комплексы, технологии изготовления метаповерхностей и нанопленок, а также их электродинамические модели, построенные в программных комплексах HFSS и CST.

В работе использован бистатический комплекс с двумя рупорными антеннами, синтезатором частот и измерителем мощности. Измерения выполнялись с угловым шагом 5° , нормировка производилась относительно свободного пространства и металлического зеркала.

Дополнительно применен квазимоностатический комплекс в безэховой камере с пространственным шагом поворота 1° . Частотный диапазон измерений составлял 18–26 ГГц, а размеры эталонного и исследуемого образцов — 170×170 мм.

Использован также волноводный метод в диапазоне 2,2–4,2 ГГц, предназначенный для исследования отдельных элементов метаструктур и нанометровых пленок.

Численное моделирование выполнено в HFSS и CST Studio с применением поглощающих граничных условий, расчета дальней зоны и техники эквивалентного представления тонких проводящих слоев.

В *третьей главе* исследовано влияние ориентации и взаимного расположения полосковых резонаторов. Показана выраженная поляризационная зависимость однонаправленных структур. При сонаправленном расположении резонаторов коэффициент прохождения в области 21–22 ГГц снижается примерно до 10%, тогда как при ортогональном расположении он остается существенно выше.

Для двусоставных шахматных метаповерхностей автор устанавливает, что их частотный отклик в значительной степени формируется как суперпозиция откликов составляющих однонаправленных структур. На основании этого предлагается управлять рабочей полосой частот путем подбора ориентации и геометрии ячеек.

Важным результатом главы является переход к спиралевидным треугольным резонаторам. С использованием HFSS и CST исследованы распределения электрического поля и поверхностных токов. Механизм ослабления интерпретирован как результат перераспределения энергии и деструктивной интерференции волн, переизлучаемых отдельными элементами и металлической подложкой.

При моделировании получено несколько резонансных пиков, причем наибольшее расчетное значение коэффициента ослабления, равное 0,9, приходится на частоту 17,6 ГГц. Экспериментальные зависимости воспроизводят положение основных резонансных областей, хотя отличаются по амплитуде.

Измерения в безэховой камере показали базовое ослабление порядка 10 дБ и резонансный минимум около 19,2 ГГц, где снижение отраженного сигнала достигает примерно 35 дБ. Одновременно установлена выраженная зависимость результата от ориентации линейной поляризации.

Для треугольной метаповерхности выявлены области аномального отражения при углах около 20° и 51° . В выводах по главе сообщается об ослаблении нормальной составляющей до 80% для шахматных структур и о повышении рассеиваемой мощности до 90% при использовании спиралевидных треугольных резонаторов.

Четвертая глава посвящена исследованию ослабления на алюминиевых нанопленках и созданию комбинированного покрытия.

Пленки формировались методом магнетронного осаждения. Автор связывает их поглощение с омическими потерями в неоднородном островковом проводящем слое. Из-за сложности прямого измерения нанометровой толщины она оценивалась по времени напыления и контролировалась по электрическим характеристикам. Наиболее высокое поглощение, около 25%, зафиксировано для пленок расчетной толщиной примерно 5 нм.

В волноводных измерениях максимум поглощения наблюдался при толщине 5–7 нм и поверхностном сопротивлении около 350 Ом.

Комбинированное покрытие включает металлический отражатель, планарную метаструктуру, диэлектрический слой и матрицу алюминиевых пленок толщиной около 5 нм.

Согласно приведенным результатам, добавление пленочного слоя уменьшает как главный, так и боковые лепестки. Экспериментальные резонансы смещены относительно расчетных; автор объясняет это межслойными емкостными связями и технологическими отклонениями.

В безэховой камере зарегистрировано снижение отраженной мощности комбинированной структурой на 18–25 дБ относительно металлического зер-

кала. Отмечается также уменьшение боковых максимумов в областях 20° и 51° .

В заключении подведены итоги выполненного исследования.

Рукопись диссертации выполнена и оформлена, в основном, корректно.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций

Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, в достаточной степени обоснованы в рамках диссертационного исследования. Обоснованность результатов работы обеспечивается использованием корректных методов моделирования (метод конечного интегрирования (FIT), метод конечных разностей (FDTD) и т.п.), реализованных в программных комплексах CST и HFSS, и построенных на их основе расчётных моделей.

Достоверность результатов поддерживается использованием нескольких взаимодополняющих методов:

- измерений в открытом пространстве;
- измерений в дальней зоне в безэховой камере;
- волноводного метода;
- численного моделирования в двух программных комплексах.

Достоверность результатов работы дополнительно подтверждается сопоставлением моделирования и эксперимента. Несмотря на расхождения, совпадение основных резонансных областей подтверждает физическую содержательность выбранной модели.

Новизна научных положений, выводов и рекомендаций

Новизна научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, сомнений не вызывает. Научная новизна работы состоит не столько в использовании метаповерхностей или тонких металлических пленок по отдельности, сколько в комплексном исследовании их совместного действия.

Научная новизна работы заключается в следующем:

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° .

Соответствие диссертации и автореферата установленным требованиям

Работа соответствует следующим пунктам паспорта специальности 1.3.4. Радиофизика:

п. 2. Изучение линейных и нелинейных процессов излучения, распространения, дифракции, рассеяния, взаимодействия и трансформации волн в естественных и искусственных средах.

Диссертация по содержанию и оформлению удовлетворяет действующим требованиям Положения о присуждении ученых степеней. В диссертации имеются все необходимые ссылки на авторов и источники заимствованных материалов, в том числе – на научные работы соискателя.

Автореферат соответствует основным положениям диссертации, достаточно полно передает ее содержание, позволяет ясно представить сформулированные в диссертации задачи исследования, основное содержание и идеи работы, а также выводы и рекомендации и удовлетворяет требованиям Положения о присуждении ученых степеней.

Наиболее значимые теоретические и практические результаты диссертации

К значимым с теоретической точки зрения результатам относятся:

- установление влияния ориентации и симметрии резонаторов на частотный и угловой отклик;
- исследование шахматных метаповерхностей;
- разработку спиралевидных треугольных резонаторов;

- выявление зон бокового аномального отражения;
- создание комбинированного покрытия;
- подтверждение возможности одновременно уменьшать главный и боковые лепестки отраженного поля.

Работа отличается значительным объемом экспериментального материала, использованием современных методов измерения и численного моделирования, а также практической реализацией исследуемых структур.

Практическая значимость заключается в разработке технологически реализуемой конструкции, элементы которой изготовлены доступными методами: фрезерованием фольгированного стеклотекстолита и магнетронным напылением алюминия.

Положительно следует оценить и исследование предельных режимов нанопленок при воздействии мощного СВЧ-поля. В работе использовался магнетронный генератор на частоте 2,45 ГГц мощностью до 700 Вт.

Личный вклад соискателя в разработку научной проблемы

По результатам рассмотрения диссертации и опубликованных трудов соискателя следует подчеркнуть, что основные результаты, изложенные выше, получены Болдыревым Н.А. и характеризуют его личный вклад в решение поставленных задач. Таким образом, указанные научные результаты диссертации, несомненно, получены автором самостоятельно и свидетельствуют о достижении поставленной цели диссертационного исследования.

Апробация и публикации

Основные положения работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях:

- XXVIII Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь», посвященной памяти Б.Я. Осипова. Воронеж, 2022 г.;
- 33 Международной крымской конференции «СВЧ-техники и телекоммуникационных технологий». Севастополь, 2023
- XXIX Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь», посвященной 70-летию кафедры радиофизики ВГУ, Воронеж, 2023 г.;
- Международной научной конференции «Излучение и рассеяние электромагнитных волн» (RSEMW 2026), п. Дивноморское, 2023 г.;
- Одиннадцатой Всероссийской научной школе-семинаре «Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с по-

лупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами», Саратов, 2024 г.;

– 34 Международной крымской конференции «СВЧ-техники и телекоммуникационных технологий», Севастополь, 2024;

– XXX Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь», Воронеж, 2024 г.

По тематике диссертационных исследований автором опубликовано 7 научных статей в журналах из перечня изданий ВАК (1.3.4, физические науки), 2 научных работы в изданиях, входящих в международные базы данных WoS / Scopus. Было также сделано 7 докладов на международных и всероссийских научно-технических конференциях.

Таким образом, общий уровень апробации и публикаций автора является вполне достаточным для кандидатской диссертации.

Недостатки диссертационной работы

1. Глава 1 данной диссертационной работы безусловно дает необходимую основу для последующих экспериментальных разделов. Однако обзор местами носит учебно-описательный характер. Значительное внимание уделяется общим сведениям о материалах, программном обеспечении и технологии изготовления, тогда как критическое сопоставление непосредственно близких комбинированных с резистивными нанопленками метаструктур (метапоглопителей) представлено недостаточно полно. В имеющемся виде обзор подтверждает значимость направления, но не полностью определяет положение разработанной структуры относительно мирового уровня.

2. Автор учитывает собственный фон безэховой камеры, который во всем диапазоне не превышает минус 50 дБ, и показывает, что при отклонении более чем на 15° вклад фоновых переотражений становится заметнее. Вместе с тем, уровень количественного метрологического обоснования следовало бы расширить путем добавления погрешности измерения мощности, погрешности углового позиционирования, величины разброса между несколькими экземплярами структуры одного типа, доверительных интервалов измерений.

3. В работе величина $A(f)$ определяется как дополнение суммы коэффициентов прохождения и отражения до единицы и интерпретируется как интегральная величина диссипативных потерь. Однако коэффициент отражения в открытом пространстве измеряется приемной антенной в определенном направлении, близком к нормальному, а исследуемые метаповерхности перераспределяют энергию в боковые лепестки. Следовательно, величина « $1-T(f)-R(f)$ » в такой схеме может включать не только истинное поглощение, но и отражение за пределами апертуры приемной антенны, боковое рассея-

ние, дифракцию на краях метаповерхности, кросс-поляризованную составляющую, потери измерительной системы. Это замечание не обесценивает зафиксированное снижение нормальной составляющей, но требует уточнения интерпретации механизма.

4. В ряде случаев модель правильно воспроизводит общую динамику, но не форму диаграммы рассеяния. Например, для двунаправленной структуры число, положение и форма боковых лепестков в расчете и эксперименте различаются. Для спиралевидной структуры резонансные частоты в целом совпадают, но амплитуды отличаются, а расхождение на 16,4 ГГц отнесено к измерительной ошибке без количественного анализа ее происхождения. В комбинированной структуре экспериментальные резонансы систематически смещены относительно расчетных. Объяснение межслойной емкостной связи и технологическими отклонениями физически правдоподобно, но желательно было бы подтвердить его параметрическим расчетом.

5. В тексте коэффициенты A , L , T , R и термин TRL используются не вполне единообразно. В некоторых местах снижение нормального отражения называется поглощением, хотя одновременно фиксируются боковые лепестки.

6. Остается неясным, с какой целью в главе 3 приведены выражения для расчета электростатического потенциала методом конечных разностей. Далее приводится модель в HFSS для одиночного элемента, а для структуры из четырех треугольных резонаторов – модель в CST. При этом результаты, полученные с помощью трех различных подходов, никак не сравниваются между собой.

7. Значительная часть волноводных исследований пленок проведена на частотах 2,4–4,2 ГГц, а испытания при высокой мощности — около 2,45 ГГц. Итоговое покрытие предназначено для диапазона порядка 16–26 ГГц. Автор указывает на слабую частотную зависимость тонкопленочного слоя и проводит дополнительные измерения в открытом пространстве, однако было бы полезным наличие более строгого обоснования переноса результатов между диапазонами.

Несмотря на ряд недостатков, диссертационная работа в целом оценивается положительно.

Общая оценка диссертационной работы

В целом диссертационная работа Н.А. Болдырева является законченным исследованием, содержащим новые научно обоснованные решения по возможностям ослабления отраженной СВЧ волны структурой планарного метаматериала, содержащего тонкие пленки.

Тематика исследований диссертационной работы соответствует заявленной специальности.

Диссертация и автореферат написаны корректно и качественно оформлены. Содержание автореферата соответствует основным положениям диссертации.

Диссертационная работа соответствует всем требованиям, установленным «Положением о присуждении ученых степеней в ФГАОУ ВО ЮФУ» (приказ ЮФУ № 62-ОД от 27 марта 2026 г.), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Болдырев Николай Алексеевич, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. Радиофизика.

Согласен на включение своих персональных данных в аттестационное дело соискателя ученой степени Н.А. Болдырева и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент

доктор физико-математических наук,
доцент, заместитель начальника научно-
го отдела АО «Самарское инновацион-
ное предприятие радиосистем»

«2» сентября 2026 г.

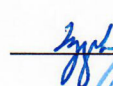


А.М. Нещерет

Подпись А.М. Нещерета заверяю:

Секретарь НТС АО «СИП РС»,

г.н.с. НО 3 НИО 235, д.т.н., профессор



М.А. Бузова



Нещерет Анатолий Михайлович, гражданин Российской Федерации, доктор физико-математических наук (специальность 1.3.4. Радиофизика), доцент, заместитель начальника научного отдела АО «Самарское инновационное предприятие радиосистем», г. Самара. 443052, Россия, Самарская область, г. Самара, ул. Земеца, 26Б
Тел.: +7 (846) 203-23-40
E-mail: nam@siprs.ru
Сайт: <https://siprs.ru/>