

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук

Профессора кафедры общей физики

физического факультета

ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет»

Донца Игоря Владимировича

На диссертационную работу

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»

Актуальность темы диссертации

Обусловлена тем, что разработка радиопоглощающих покрытий является крайне важной. Это нужно прежде всего для снижения радиозаметности проводящих объектов и экранирования всевозможной радиоаппаратуры от электромагнитных помех. По мнению автора работы, существующие радиопоглощающие материалы обладают целым рядом недостатков: большой необходимый объём и масса, узкая полоса рабочих частот.

Предлагается автором в качестве радиопоглощающего материала комбинации рассеивающих метаповерхностей и резистивных слоев. Резистивные слои — это нанометровые металлические пленки.

Содержание диссертационной работы и основные результаты

Диссертационная работа общим объемом 119 стр., включает в себя введение, четыре главы, заключение и список литературы из 102 наименований. В работе 57 рисунков и одна таблица.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель и задачи работы, показана новизна, обоснована теоретическая и практическая значимость результатов исследований, достоверность полученных основных результатов, показана апробация диссертационной работы на конференциях, перечислены основные публикации, а также сформулированы основные результаты и положения выносимые на защиту.

В первой главе диссертации анализируются современные подходы к вопросам поглощения электромагнитных волн. Обосновывается перспективность комбинирования резонансных метаповерхностей с активными поглощающими слоями. Рассматриваются вопросы моделирования указанных структур пакетами CST и HFSS.

Во второй главе детально описываются методики проведенных экспериментов и использованное измерительное оборудование. Обоснован бистатистический метод исследования дифракции на исследуемых структурах.

Третья глава посвящена описанию полученных результатов для планарных метаповерхностей в частотном диапазоне 16-25 ГГц. Рассмотрены различные типы элементарных плоскостных ячеек метаповерхностей. Рассмотрены прямоугольные полосы а также спиральные треугольные резонаторы. Рассмотрены различные варианты взаимного расположения ячеек друг относительно друга. Расчеты произведены в основном в пакете CST.

В четвертой главе исследуются поглощающие свойства нанометровых пленок алюминия и проводится итоговая разработка комбинированного поглощающего покрытия. Экспериментально доказывается что максимальное поглощение достигается при толщине алюминиевой пленки 5-7 нм. Приводятся результаты обмера поглощающего покрытия в безэховой камере, которые показали значительное ослабление отраженной волны при перпендикулярном падении.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы, определены перспективы использования предлагаемых конструктивных решений для понижения радиозаметности металлических объектов.

Научная новизна результатов диссертационной работы заключается в том, что по мнению автора впервые:

1. Реализовано и экспериментально исследовано ослабляющее электромагнитные волны объединяющее планарное метаструктурное покрытие и резистивные нанометровые пленки алюминия.
2. Раскрыт механизм фазового сдвига в сложносоставной метаповерхности из последовательных резонаторов с поглощающим слоем обеспечивающий ослабление отраженной волны.
3. Частотная характеристика шахматной метаповерхности является суперпозицией частотных свойств составляющих.
4. Резистивный слой подавляет также боковые лепестки кроме подавления главного.

Теоретическая и **практическая значимость работы** заключается в следующем:

Разработаны электродинамические модели планарных метаповерхностей, расчетные данные которых верифицируются результатами многочисленных экспериментов.

Предложенный метод добавления к метаповерхностям резистивного слоя

позволяет минимизировать боковые лепестки и дополнительно ослабить главный лепесток.

Предложена удачная форма комбинированного ослабляющего покрытия из спиралевидных планарных метаструктур и поглощающих пленок алюминия.

Недостатки и замечания по диссертационной работе

Но работа не свободна от замечаний.

- 1) стр.6 Не удачно сформулировано первое положение из научной новизны «экспериментально подтверждено его превосходство над отдельными компонентами». Читателю предоставляется право самому догадываться что из себя представляют эти компоненты.
- 2) Стр.7 положение новизны 3. «Частотный отклик является суперпозицией частотных откликов составляющих». Суперпозиция подразумевает четкую математическую формулировку и вполне определенные весовые коэффициенты. Непонятно, где в диссертации рассчитываются эти коэффициенты.
- 3) Стр.16 «используют принцип уменьшения амплитуды колебаний путем наложения падающей и отраженной волны в противофазе». Обычно налагаются волны, идущие в одном направлении для достижения указанного эффекта. То есть, например, отраженные от разных границ.
- 4) Стр.21. рис.1.1 Схема экспериментальной установки. Элемент под номером 12 – «распределительный щит электропитания» можно было не указывать.
- 5) Стр.22 – стр.23. Формулы 1.3, 1.4, 1.5. В тексте после формулы 1.3 сказано, что « Z – волновое сопротивление линии, в которой расположен материал». То же самое Z – заглавная латинская используется в формулах 1.4 и 1.5. Но в этих формулах под Z подразумевается фазовый множитель, а не волновое сопротивление. В 1.4, 1.5 надо было использовать другой символ и обязательно оговорить его в тексте.
- 6) Стр.23 в конце. Упомянув пакеты электродинамического моделирования такие как HFSS не обязательно проводить расшифровку их названия. Но если приводить, то желательно правильно. HFSS – это не «High frequency simulation software» а «High frequency Structure Simulator»
- 7) Стр.24. Не нужно приводить систему уравнений Максвелла, если дальше по тексту диссертации не проводятся их преобразования. Достаточно дать ссылку на литературный источник.
- 8) Стр.24, 25, 26. Непонятно зачем приводить популярное описание принципов решения электродинамических задач, реализованных в таких коммерческих пакетах как HFSS и CST. Можно дать ссылки на многочисленные литературные источники, в которых есть такие описания. Может быть автор заинтересовался написанием отечественных аналогов таких программ? Но к теме диссертации это не имеет отношения.

- 9) Стр.29 абзац 3. «Измерительная установка» «состоял», нужно «состояла».
- 10) Стр.30 Шаг по углу 5 градусов. Не оговаривается выбор такого шага.
- 11) Стр.35. рис.2.5 В легенде рисунка три кривых, нарисовано только две. Фактически кривые не подписаны, так как непонятно, где какая.
- 12) Стр.53. Исследуя периодическую метаповерхность, была взята одна элементарная ячейка и сделан проект в HFSS, но граничные условия на этой ячейке были взяты непериодические, что не учитывает в расчете взаимовлияние соседних элементов.
- 13) Стр.59 Рис.3.1 Кривые практически не подписаны, видимо рисунок был цветной и разные кривые были обозначены разным цветом, но в бумажной диссертации рисунок черно – белый.
- 14) Стр.65 рис.3.6. Непонятно зачем были использованы английские слова для обозначения трех уровней. Диссертация опубликована на русском языке.
- 15) Стр.66 Последний абзац - не согласованы падежи.
- 16) Стр. 69. Рис.3.9 Приводится сравнение модельных и экспериментальных данных. Эти результаты сильно отличаются. В тексте отсутствует оценка расхождения и нет объяснения причин.
- 17) Стр. 72. Приводятся формулы конечно - разностного метода. Но непонятна постановка задачи. Какое уравнение решалось конечно – разностным методом? При каких допущениях? Зачем это делалось?
- 18) Стр.89. Рис. 4.1 На рисунке не обозначены толщины пленок, только их сопротивления. Обсуждение же в тексте этого рисунка использует термины «толщины пленок» в нм.
- 19) Стр.91. Рис.4.3 Кривые неразличимы на графике.

Общее заключение по диссертационной работе

Указанные замечание не являются принципиальными, и не снижают качество, новизну, важность проведенных исследований и не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы Болдырева Николая Алексеевича.

Диссертация, в целом, оформлена в соответствии с требованием ГОСТов Российской Федерации на оформление текстовых документов.

Тема диссертации соответствует паспорту научной специальности 1.3.4. — Радиофизика.

Автореферат в полном объеме отражает основное содержание диссертации. Все научные выводы, рекомендации и положения, выносимые на защиту, достаточно полно представлены в публикациях автора.

По диссертации опубликовано 10 печатных работ, из которых 2 опубликованы в журналах, индексируемых в наукометрических базах Web Of Science и Scopus, 8 в

