

УТВЕРЖДАЮ

Директор
Саратовского филиала института
радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН
доктор физ.-мат. наук



Филимонов Ю. А.

«24» *сентября* 2014 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию **Шиловского Павла Александровича** «Электродинамические свойства и математические модели гиперболических метаматериалов» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 01.04.03 – Радиофизика и 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Диссертационная работа посвящена разработке методов численного моделирования и теоретическому исследованию дисперсионных электродинамических свойств сложных периодических структур (метаматериалов). Как известно, в последние десятилетия исследования метаматериалов получили широкое распространение в связи с их уникальными электрофизическими, радиофизическими и оптическими свойствами, недостижимыми при использовании обычных материалов, что открывает широкие прикладные возможности по созданию приборов для управления ближним электромагнитным полем (новые типы электромагнитных сенсоров, линзы с субволновым разрешением, малогабаритные антенны, объекты, “невидимые” в определенном диапазоне частот и др). Особый интерес представляют гиперболические метаматериалы, характеризуются анизотропным тензором диэлектрической (или магнитной) проницаемости. В зависимости от угла распространения такие материалы способны пропускать или подавлять электромагнитные волны, передавать ближние электромагнитные поля на сравнительно большие расстояния и повышать эффективность излучателей. В настоящее время, в основном, исследуются две практически реализуемые модели гиперболических сред: многослойная периодическая планарная структура и, так называемая, «проволочная среда», состоящая из большого числа металлических проводов наноразмерного поперечного сечения, периодически упорядоченных в диэлектрической матрице. Такие типы конструкции гиперболических метаматериалов позволяют адаптировать их для работы в широком диапазоне длин волн посредством подбора параметров: типа металла, периода и фактора заполнения среды металлом. В связи с технологическими трудностями и дороговизной изготовления метамате-

риалов, математическое моделирование и вычислительный эксперимент являются актуальными методами их исследования. Численный анализ таких структур сопряжён со значительными вычислительными затратами, поэтому необходима разработка параллельных алгоритмов и комплексов программ. Все вышесказанное подтверждает актуальность темы, цели и задач диссертации.

Содержание работы соответствует паспорту специальности 01.04.03 – радиофизика в части, относящейся к изучению процессов распространения и трансформации волн в естественных и искусственных средах, и специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ в части, относящейся к разработке, обоснованию и тестированию эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 122 наименований.

Во *введении* обоснована актуальность выбранной темы диссертации, сформулированы её цель и задачи, определена научная новизна результатов работы, а также их теоретическая и практическая значимость, приведены положения и результаты, выносимые на защиту.

В *первой главе* приведён сравнительный анализ существующих методов моделирования распространения электромагнитных волн в метаматериалах. Наиболее подробно описан метод интегральных уравнений и функций Грина, используемый для получения большинства физических результатов диссертации.

Во *второй главе* рассмотрены одномерно-периодические и двумерно-периодические структуры. В частности, исследована замедляющая система на основе диэлектрической гребенки с металлизацией. Показано, что такая конфигурация обладает законом дисперсии близким к линейному и практически постоянным замедлением в области низких частот. Рассмотрены квазипериодические структуры, состоящие из конечного числа чередующихся слоев металла и диэлектрика, и установлено, что данные структуры могут служить основой при создании тепловых электромагнитных экранов. Исследованы двумерно-периодические фотонные кристаллы, состоящие из бесконечно-протяжённых металлических стержней. При отсутствии проникновения поля вглубь стержней, что реализуется на низких частотах, для данных структур построены математические модели в тонкопроволочном приближении, что позволило уменьшить размерность задачи и решать интегральные уравнения лишь относительно компонент электрического поля, параллельных стержням. Продемонстрировано, что такие структуры обладают низкочастотной от-

сечкой и отрицательными значениями компоненты тензора диэлектрической проницаемости, соответствующей ориентации проволочек. Результаты численного моделирования на более высоких частотах, когда поле проникает вглубь металлического стержня, показывают возможность передачи электромагнитной энергии в данной среде с малыми потерями вплоть до инфракрасного диапазона частот.

В *третьей главе* исследованы трехмерно-периодические фотонные кристаллы с металлическими и диэлектрическими включениями. Построены математические модели в тонкопроволочном приближении для проволочных металлических структур двух типов: с включениями из металлических стержней конечной длины и с включениями из металлических колец. Показано, что стержневые структуры обладают полной запрещенной зоной для поперечных волн, которая сужается с увеличением нормированной продольной компоненты волнового вектора, в то время как кольцевые структуры обладают лишь неполной запрещенной зоной. Исследованы трехмерно-периодические структуры с включениями в виде прямоугольных параллелепипедов из металла или диэлектрика. Показано, что при наноразмерных металлических включениях такие структуры обладают частотно-фильтрующими свойствами в области высоких частот.

В *четвертой главе* приведено описание разработанного метода поиска корней дисперсионного уравнения, а также последовательной и параллельной версии алгоритма расчета. Рассмотрена архитектура программного комплекса, реализующего данный алгоритм и позволяющего проводить вычисления на параллельных системах под управлением технологий Message Passing Interface и Open Calculation Language. Проведено тестирование и показана эффективность данного программного комплекса.

Научную новизну имеют следующие основные результаты:

- Построены новые математические электродинамические модели пространственно-периодических структур с металлическими проволочными включениями. Ввиду малого радиуса проволок по сравнению с длиной и периодом решетки было введено тонкопроволочное приближение, позволившее снизить размерность задачи и строить интегральные уравнения лишь относительно продольных компонент электрического поля.
- Исследованы дисперсионные характеристики металлических проволочных периодических структур с включениями в виде конечных или бесконечно-протяженных металлических стержней, а также в виде металлических колец. Показано, что в случае идеального металла на низких частотах стержневые структуры обладают

запрещёнными зонами для электромагнитных волн, распространяющихся поперек металлических стержней. При этом низкочастотная запрещённая зона сужается при увеличении продольной нормированной компоненты волнового вектора. В запрещённых зонах получены численные оценки для отрицательных значений компонент тензора диэлектрической проницаемости. Продемонстрировано, что при условии проникновения поля внутрь металла на высоких частотах (вплоть до инфракрасного диапазона частот) такие структуры могут передавать электромагнитную энергию с малыми потерями. Показано, что для структур с кольцевыми металлическими включениями характерна неполная запрещённая зона для электромагнитных волн, распространяющихся параллельно плоскости колец.

- Исследованы дисперсионные свойства трехмерно-периодических фотонных кристаллов с включениями в виде прямоугольных параллелепипедов из металла и диэлектрика. Показано, что для достижения частотно-фильтрующих свойств в области инфракрасного диапазона необходимо использовать наноразмерные кубические включения.
- Исследованы электродинамические свойства квазипериодических одномерно-периодических структур из металлических и диэлектрических слоев и показано, что такие структуры могут служить основой при создании тепловых электромагнитных экранов.
- Разработан метод поиска корней дисперсионного уравнения, основанный на анализе изменения скорости целевой функции, а также реализующий его программный комплекс, предназначенный для выполнения расчётов на параллельных вычислительных системах.

Теоретическая и практическая значимость. Полученные результаты расчёта электродинамических характеристик метаматериалов существенно дополняют современные представления о распространении электромагнитных волн в искусственных средах. Результаты работы могут быть использованы при проектировании устройств на основе метаматериалов. Предложенный в работе метод поиска корней дисперсионного уравнения и разработанный программный комплекс могут быть использованы при расчете электродинамических характеристик метаматериалов. Особо следует отметить, что разработанные в диссертации математические алгоритмы и расчетные компьютерные программы имеют гораздо более широкую область применения в радиофизике, чем моделирование гиперболи-

ческих метаматериалов, Этот факт значительно повышает теоретическую и практическую значимость работы.

Результаты диссертационной работы могут быть использованы на предприятиях и в организациях электронной промышленности (ФГУП «НПП «Исток», г. Фрязино, Московская область, ЗАО «НПЦ «Алмаз-Фазотрон», г. Саратов), институтах Российской академии наук (Фрязинский филиал ФГБУН ИРЭ РАН, г. Фрязино, Московская область, Саратовский филиал ФГБУН ИРЭ РАН, г. Саратов), в высших учебных заведениях Министерства образования и науки Российской Федерации (ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва), ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Зеленоград, ФГАОУ ВПО «Южный федеральный университет», ФГБОУ ВПО «Самарский государственный университет», ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского»).

Достоверность и обоснованность результатов диссертации обеспечивается использованием строгих электродинамических моделей анализа и внутренней сходимостью применяемых алгоритмов. Достоверность части численных результатов подтверждена их совпадением с экспериментальными и теоретическими результатами других авторов.

В то же время имеются **следующие замечания** к работе.

1. Основные достижения диссертанта относятся к разработке математических алгоритмов и компьютерных программ расчета композиционных материалов с металлическими включениями. Положительным фактом, как уже отмечалось выше, является то, что данные алгоритмы и программы имеют гораздо более широкую область применения в радиофизике, чем моделирование гиперболических метаматериалов. В связи с этим представляется, что конкретное упоминание термина гиперболические метаматериалы в названии диссертации не оправдано, поскольку оставляет впечатление о более узкой направленности исследования, нежели фактически выполненное.

2. При формулировке первого положения, выносимого на защиту, автору следовало бы акцентировать внимание на методологическом аспекте, представив как достижение полученное им обоснование указанного там результата в рамках разработанного в диссертации оригинального численного метода, позволяющего более точно вычислять электродинамические параметры тонкопроводящей среды. Фактически же речь идет о достаточно известных к настоящему времени свойствах рассматриваемых сред, на обнаружение которых данная

работа претендовать не может. (См., например, обзор [J.B. Pendry, *Contemporary Physics*, 2004, vol. 45, no. 3, 191-202 и обзор [3] в списке литературы к диссертации.)

3. Во Введении (на стр. 6) диссертации указано, что «в известной литературе остались малоизученными металлические тонкопроволочные фотонные кристаллы (ФК) и металло-диэлектрические плоскостойкие среды». С этим утверждением нельзя согласиться, поскольку указанные структуры детально исследовались рядом научных групп. (См., например обзоры [Simovski, C. R., Belov, P. A., Atrashchenko, A. V., Kivshar, Y. S., “Wire Metamaterials: Physics and Applications”, *Adv. Mater.*, 24, 4229–4248 (2012); J Cortes, C.L., Newman, W., Molecules, S., Jacob, Z., “Quantum nanophotonics using hyperbolic metamaterials,” *Journal of Optics*, .14, 063001(15) (2012)].) Следовало бы обсудить данный момент более подробно и указать конкретно, какие именно свойства упомянутых структур недостаточно изучены.

4. В параграфе 2.1 диссертации получена дисперсия замедляющей системы типа «диэлектрической гребенка с металлизацией». Делается вывод о том, что величина замедления постоянна в широкой полосе частот. Этот факт отмечается в числе пунктов, подтверждающих новизну полученных результатов (на стр. 11 диссертации). Однако, поскольку в диссертации отсутствует сравнение данной замедляющей системы с другими известными типами замедляющих систем по величине ширины полосы, данный вывод выглядит недостаточно обоснованным. В конце параграфа 2.1 отмечается, что величина замедления постоянна на низких частотах. В то же время, далее делается парадоксальное утверждение о том, что это позволяет использовать данный тип замедляющей системы в терагерцевом диапазоне (т.е. на крайне высоких частотах).

Сделанные замечания не сказываются на общей положительной оценке диссертационной работы. По материалам проведённого исследования опубликовано 14 печатных работ, в том числе 7 статей в журналах, рекомендованных ВАК при Минобрнауки РФ, и 7 статей в сборниках международных и российских конференций. Также получено свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Основные результаты широко апробированы и доложены на конференциях различного уровня. Автореферат правильно отражает основное содержание диссертации.

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, которая соответствует требованиям пунктов 9-14, предъявляемым к кандидатским диссертациям «Положением о присуждении учёных степеней», утверждённым постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 года. Автор работы Шиловский Павел Александрович заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальностям 01.04.03 – Радиофизика и 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Отзыв составлен заведующим лабораторией фотоники, доктором физико-математических наук, профессором Поповым В.В., заведующим лабораторией теоретической нелинейной динамики, доктором физико-математических наук, профессором Кузнецовым С.П. и старшим научным сотрудником кандидатом физико-математических наук Козиной О.Н.

Отзыв рассмотрен и одобрен на заседании Секции Ученого совета Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН в Саратовского филиале (протокол №11 от 24 сентября 2014 года).

Заведующий лабораторией фотоники
Саратовского филиала института
радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН,
д.ф.-м.н., профессор

Попов Вячеслав Валентинович

Заведующий лабораторией теоретической нелинейной динамики
Саратовского филиала института
радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН,
д.ф.-м.н., профессор

Кузнецов Сергей Петрович

Старший научный сотрудник
Саратовского филиала института
радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН,
к.ф.-м.н.

Козина Ольга Николаевна

Почтовый адрес: 410019, г. Саратов, ул. Зеленая, д. 38
Тел.: 8(8452)272401
Электронная почта: info@soire.renet.ru