

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Шиловского П.А. "Электродинамические свойства и математические модели гиперболических метаматериалов", представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 01.04.03 – радиоп физика, 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

В большинстве случаев метаматериалы – искусственно созданные периодические структуры. Они, с одной стороны, обладают свойствами, не встречающимися в природе или технологически сложно достижимыми, с другой стороны, их свойства близки к свойствам кристаллической решетки твердых тел. Одной из отличительных особенностей некоторых периодических структур является то, что распространение электромагнитной волны в них можно трактовать как распространение в среде с отрицательными диэлектрическими и магнитными проницаемостями. Хотя это явление наблюдается в узкой полосе частот, оно привлекло внимание большого числа исследователей. Применение метаматериалов невозможно или технологически сложно без теоретического исследования их свойств. Расчет большинства трехмерных метаматериалов – сложная электродинамическая задача, обусловленная не только сложностью самой структуры, но и необходимостью работать в резонансной области частот, в которой размеры элементарной ячейки периодической структуры соизмеримы с длиной волны. В силу этого применение приближенных, например, квазистатических или асимптотических методов невозможно. Одним из наиболее эффективных методов решения краевых задач в резонансной области частот является метод интегральных уравнений, который используется в диссертации. В силу вышесказанного, считаю, что тема диссертации, посвященная разработке электродинамических моделей периодических структур, их численной реализации, исследованию

радиофизических свойств метаматериалов, является **актуальной**, а её результаты – востребованными для практического применения, например, при расчете устройств, содержащих метаматериалы.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы:

В диссертации представлены следующие новые научные **результаты**:

1. В *первой главе диссертации* проведен пяти методов теоретического исследования распространения электромагнитных волн в периодических структурах.

2. *Во второй главе* исследуются одномерные и двумерные периодические структуры. При расчете замедляющей системы вида "диэлектрическая гребенка с металлизацией" для упрощения введена эффективная диэлектрическая проницаемость. Показано, что такая замедляющая система перспективна для создания ламп бегущей волны, т.к. имеет малую дисперсию в широком диапазоне частот. Исследованы также одномерные периодические структуры, образованные повторяющимися диэлектрическими слоями. Такие структуры известны, широко используются в оптике, например, в качестве зеркал, имеющих почти 100% коэффициент пропускания в заданном диапазоне частот. Для их расчета не требуется метод интегральных уравнений. Элементом новизны можно считать использование в качестве одного из слоев наноразмерной металлической пленки, у которой в оптическом диапазоне конечная диэлектрическая проницаемость. Проведенные исследования показали возможность создания теплового экрана, прозрачного в видимом диапазоне и непрозрачном в инфракрасном. Далее исследованы двумерные периодические структуры, образованные бесконечно длинными металлическими проволочками. Проволочки как идеальные, так и с учетом проникновения поля в них в оптическом диапазоне. Задача решается приближенно – пренебрегается поперечная компонента тока. Достоинство – простота полученных дисперсионных уравнений, недостаток – нет оценки точности решения. Проведены

исследования свойств металлических фотонных кристаллов. Утверждается, что для волн, распространяющихся вдоль проволок, металлический фотонный кристалл – идеальная направляющая структура.

3. В третьей главе исследуются трехмерные периодические структуры. Интегральные уравнения для металлических фотонных кристаллов, состоящих из отрезков проволок и проволочных колец, решены методом Галеркина. При этом, как и в предыдущих случаях, пренебрегалось поперечной компонентой тока. Использовался тригонометрический базис. Все матричные элементы полученной системы алгебраических уравнений найдены в аналитическом виде. Показано, что второй металлический фотонный кристалл обладает магнитными свойствами. В этой же главе исследованы фотонные кристаллы, содержащие металлические и диэлектрические кубические элементы. Интегральные уравнения также решаются методом Галеркина с учетом всех компонент тока. Используются кусочно-постоянные функции. При этом возникает проблема понижения особенности ядра, так как в противном случае интегралы, а матричных элементах расходятся. Предложены новые способы решения этой проблемы путем дополнительного интегрирования по координате точки наблюдения. Приведены результаты расчетов дисперсионных характеристик. Сравнены запрещенные зоны одномерных и трехмерных фотонных кристаллов. Отмечено, что наличие потерь приводит к смыканию ветвей дисперсионных характеристик прямой и обратной волны.

4. Четвертая глава посвящена описанию численной реализации полученных решений. Следует отметить оригинальный алгоритм для локализации корней дисперсионного уравнения при наличии полюсов, основанный на анализе скорости изменения целевой функции, и распараллеливание задачи.

Вопросы и замечания:

1. В первой главе диссертации не отмечены такие популярные, используемые в коммерческих пакетах, методы, как метод конечного

интегрирования, метод конечных элементов. Метод интегральных уравнений также изложен поверхностно. Не отмечено, что приведенные интегральные уравнения справедливы только для решеток, все элементы которых расположены в однородном диэлектрике. В метаматериалах в основном используются решетки на слоистых подложках. Для них вид интегральных уравнений более сложный.

2. Большинство задач решено приближенно, но в большинстве случаев нет оценки точности и границ применимости найденных решений, в частности, для проволочных фотонных кристаллов, диэлектрической гребенки с металлизацией.

3. Утверждается, что для волн, распространяющихся вдоль проволочек, металлический фотонный кристалл – идеальная направляющая структура. К сожалению, из приведенных результатов это не очевидно. Этот результат интересен, так как металлические нановолноводы, в которых распространяется поверхностный плазмон-поляритон, в видимом диапазоне имеют достаточно высокие потери, а в инфракрасном – малые потери и небольшую локализацию поля.

4. При решении интегрального уравнения для проволочного металлического фотонного кристалла базис не полный – $\cos(ksz)$, $ks = (2s-1)\pi/l$, четный по z . Однако при произвольном распространении волны должны быть и нечетные компоненты.

5. Следует отметить, что проблема расходимости при решении интегральных уравнений для фотонных кристаллов с кубическими элементами не возникает при использовании в качестве базиса сплайнов 1-го порядка. Интегралы были бы не намного сложнее. Лучший результат для такой простой области как куб, дал бы тригонометрический базис.

6. Непонятно, почему не исследуются фотонные кристаллы с элементами в форме параллелепипеда? Алгоритм не сильно усложняется, а расчет такой структуры позволил бы оценить точность решения задачи для проволочного фотонного кристалла.

7. К сожалению, в последней главе, не затронута задача нахождения комплексных корней дисперсионного уравнения. Эта проблема легко решается только для малых потерь.

В целом, несмотря на указанные недостатки, данная диссертация производит хорошее впечатление. Сделанные замечания не снижают научную и практическую значимость результатов и выводов работы.

Диссертация выполнена на высоком научно-техническом уровне. Автор корректно применяет электродинамические методы и методы вычислительной математики. Диссертация является научной работой, которая имеет внутреннее единство и свидетельствует о личном вкладе автора в науку. Основные положения четко сформулированы. Диссертация, несомненно, имеет **новые радиофизические результаты**, расширяющие представления о физике распространения электромагнитных волн в искусственно созданных средах. **Достоверность и обоснованность** результатов подтверждается выбором современных математических средств разработки программ расчета и согласием некоторых полученных результатов с экспериментальными данными, а также с данными теоретических исследований, представленными в работах других авторов.

Результаты диссертационного исследования многократно апробировались в ходе докладов и обсуждений на международных конференциях и школах. Все научные выводы и положения, выносимые на защиту, нашли отражение в публикациях автора – 14 печатных работах, из которых 7 статьи размещены в журналах, рекомендованных ВАК при Минобрнауки РФ для опубликования результатов кандидатских диссертаций. Кроме того, зарегистрирована программа для ЭВМ.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Подводя итог, можно заключить, что диссертация "Электродинамические свойства и математические модели гиперболических метаматериалов" является завершенной научно-квалификационной работой, отвечающей требованиям, установленным для кандидатских диссертаций в

пунктах 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 года, а её автор, Шиловский П.А., заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 01.04.03 – радиофизика, 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент,
д. ф.-м. н., профессор, профессор
кафедры прикладной электродинамики
и компьютерного моделирования
Южного федерального университета



Лерер Александр Михайлович

9 сентября 2014 года

Почтовый адрес: 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге, 5
Тел.: 8(863) 297-51-29
Электронная почта: lerer@sfedu.ru

Личную подпись
удостоверяю

Ученый секретарь Совета
Южного федерального университета

Ученый секретарь Совета
Южного федерального университета

Ученый секретарь Совета
Южного федерального университета

