

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента, д.ф.-м.н., профессора Клинаева Ю.В. на диссертационную работу *Шиловского Павла Александровича* на тему:

**«Электродинамические свойства и математические модели гиперболических метаматериалов»,**

представленную на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук по специальностям:

«01.04.03 – Радиоп физика» и «05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

### **Структура работы.**

Диссертация изложена на 125 страницах, 109 из которых содержат введение, 4 главы, заключение, 34 рисунка и 4 таблицы. Список литературы из 122 наименований представлен на 16 страницах.

### **Актуальность избранной темы.**

Диссертационная работа Шиловского П.А. посвящена теоретическому исследованию электродинамических свойств гиперболических метаматериалов, в том числе, с применением методов математического моделирования и вычислительного эксперимента на основе разработанных численных алгоритмов распараллеливания вычислительных процессов. Работа носит теоретический характер и все научные результаты, относящиеся к закономерностям проявления электрофизических свойств гиперболических метаматериалов получены на основе анализа и обобщения данных вычислительных экспериментов.

Гиперболические метаматериалы широко исследуются в связи с возможностью создания на их основе сред с отрицательными компонентами тензора эффективной диэлектрической или магнитной проницаемости. Данные метаматериалы обладают анизотропией и способностью пропускать или не пропускать электромагнитные волны, в зависимости от направления их распространения. Такие среды могут служить основой при построении различных электрофизических устройств, функционально работоспособных от сверхвысоких частот до оптического диапазона включительно.

Изготовление метаматериалов является высокотехнологичным и затратным производством, практическая реализация которого невозможна без предварительного теоретического исследования их электродинамических свойств и моделирования проектируемых физических устройств. Численный анализ подобных искусственных структур сопряжен со значительными ресурсными затратами вычислительной системы, поэтому необходимым становится разработка эффективных программных комплексов с распараллеливанием

вычислительных процессов, а также соответствующих им математических моделей и алгоритмов параллелизации вычислений.

В связи с этим, можно заключить, что тема диссертации П.А. Шиловского, ориентированная на исследование распространения электромагнитных волн в гиперболических метаматериалах, является **актуальной для радиофизики**, а также для современного этапа **развития методов математического моделирования** физических процессов в искусственных радиофизических структурах и **разработки программных средств** реализации вычислительных экспериментов на моделях этих структур.

#### **Научная и практическая новизна работы.**

В работе П.А. Шиловского получен ряд **новых научных и практических** результатов, из которых можно выделить следующие, имеющие приоритетный характер, как в области радиофизики, так и модификации численных методов и реализации их в программные приложения для математического моделирования радиофизических объектов:

1. Предложены новые математические модели металлических проволочных структур, отличающиеся приближением тонких проволочек и линейного тока, позволившем строить интегральное уравнение лишь относительно продольных компонент электрического поля и сократить размерность задачи.
2. Получена зависимость компоненты тензора эффективной диэлектрической проницаемости от частоты и волнового вектора для металлических проволочных фотонных кристаллов и установлено наличие у них полных запрещённых зон. В случае двумерной кристаллической решётки и бесконечно протяжённых включений, запрещённая зона расположена в низкочастотной области, а частотная дисперсия такой структуры аналогична плазменной. Таким образом, на низких частотах данная структура ведёт себя как гиперболический метаматериал. Также показано, что такой метаматериал может практически без потерь передавать вдоль проволочек энергию, вплоть до инфракрасного диапазона частот.
3. Установлено, что трёхмерно-периодические структуры с конечными стержнями обладают запрещённой зоной в резонансной области частот. При этом с увеличением продольной компоненты волнового вектора зона сужается и пропадает. В случае трёхмерных структур с кольцевыми включениями запрещённая зона неполная. Таким образом, достижение одновременно отрицательных значений компонент тензоров эффективной диэлектрической и магнитной проницаемости и, соответственно, отрицательной рефракции при комбинации стержней и колец является проблематичным и возможно не для всех поперечных волн.
4. Исследованы одномерные и трёхмерные металло-диэлектрические фотонные кристаллы и показано, что такие структуры обладают фильтрующими свойствами в инфракрасном диапазоне. При этом,

одномерные структуры могут служить основой для тепловых экранов, прозрачных в оптическом диапазоне.

5. Исследована замедляющая система типа «диэлектрическая гребёнка с металлизацией» и установлено, что она имеет близкий к линейному закон дисперсии и почти постоянное замедление в широкой полосе низкочастотной области.
6. Предложен новый метод решения дисперсионного уравнения, основанный на анализе скорости изменения целевой функции и позволяющий находить корни различных дисперсионных ветвей.
7. Разработанный на основе этого метода алгоритм модифицирован для производства параллельных вычислений и реализован в виде программного комплекса для расчёта дисперсионных характеристик метаматериалов, обеспечивающего масштабируемость по числу процессов и поддерживающий технологии параллельных вычислений Message Passing Interface (MPI) и Open Calculation Language (OpenCL).

#### **Достоверность полученных результатов.**

Большинство полученных радиофизических результатов получено с применением метода интегральных уравнений, основанного на аппарате функций Грина. Данный метод позволяет свести задачу моделирования к интегральному уравнению относительно включений периодичности в одной ячейке. Также в работе используется метод матриц передачи. Применяемые в работе математические модели получены с использованием строгих электродинамических моделей анализа, приводящих к сходящимся алгоритмам. Приведены удовлетворительные результаты расчета невязки граничных условий, а также показано совпадение части численных результатов с аналогичными теоретическими и практическими результатами других исследователей. Таким образом, можно говорить о **достоверности** результатов работы.

#### **Теоретическая и практическая значимость диссертации.**

**Теоретическую значимость** в диссертации имеют установленные закономерности распространения электромагнитных волн в исследованных метаматериалах и замедляющих структурах, а также разработанные математические модели. В работе предложены конструкции замедляющей системы, теплового экрана, проводящей структуры и разработан программный комплекс для расчёта дисперсионных характеристик метаматериалов. Это подтверждает **практическую значимость** проведённого исследования.

#### **Замечания.**

По работе имеются следующие **замечания**:

1. Расчёт невязки граничных условий приводится не для всех исследованных структур, что, в определённой степени, «ослабляет» полноту выводов по установленным закономерностям.
2. Не приводятся данные по сравнению приведённых в работе методов понижения особенностей ядра, используемых при построении

математических моделей металло-диэлектрических фотонных кристаллов.

3. Не приводятся результаты сопоставительного анализа существующих программных пакетов моделирования распространения электромагнитных волн в метаматериалах, что, в определённой мере, не позволяет судить о преимуществах и достоинствах разработанного в диссертации программного комплекса моделирования.
4. Среди технологий параллельных вычислений, рассматриваемых в работе, не упоминается находящаяся в открытом доступе ([developer.nvidia.com](http://developer.nvidia.com)), высокоэффективная технология CUDA (Compute Unified Device Architecture) для реализации параллельных алгоритмов моделирования на графических процессорах.

### **Заключение.**

Несмотря на сделанные замечания, диссертация П.А. Шиловского производит исключительно положительное впечатление.

Результаты работы прошли широкую апробацию на российских и международных конференциях. Основные результаты отражены в 14 публикациях, из них 7 – в журналах, включенных в перечень ведущих рецензируемых журналов и научных изданий, утвержденных президиумом ВАК Минобрнауки РФ: «Журнал технической физики», «Гетеромагнитная микроэлектроника», «Известия Саратовского Государственного Университета» и др. Также получено свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ.

Публикации в научной печати по теме диссертации достаточно полно отражают её научные положения и основные результаты, а автореферат диссертации полностью отражает ее содержание. Диссертация и автореферат написаны ясным научным языком и хорошо оформлены.

Считаю, что диссертационная работа П.А. Шиловского «Электродинамические свойства и математические модели гиперболических метаматериалов» по актуальности решенных задач, объему проведенных исследований, степени научной новизны и практической значимости результатов полностью отвечает требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, является завершённой научно-квалификационной работой, выполненной на высоком уровне; имеет существенное значение для выявления электродинамических свойств гиперболических метаматериалов на основе исследования разработанных математических моделей и свидетельствует о личном вкладе автора в разрабатываемую проблему, отвечает критериям, установленным для кандидатских диссертаций в пунктах 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней» ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации (Постановление Правительства РФ от 24.09.2013 N 842 (с изм. от 21.04.2014) "О порядке присуждения ученых степеней").

Учитывая изложенное, автор диссертации, **Шиловский Павел Александрович**, заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям: «01.04.03 – Радиофизика» и «05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Официальный оппонент,  
доктор физико-математических наук, профессор,  
профессор кафедры  
«Техническая физика и информационные технологии»  
Энгельсского технологического института (филиала)  
ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный  
технический университет имени Гагарина Ю.А.»



19.09.2014 Ю.В. Клинаев

Подпись д.ф.м.н. профессора Юрия Васильевича Клинаева



«ЗАВЕРЯЮ»

Ученый секретарь Ученого Совета  
ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный  
технический университет имени Гагарина Ю.А.»,  
д.т.н., профессор



19.09.2014

П.Ю. Бочкарев

Клинаев Юрий Васильевич, профессор; зам. директора по научной работе

ЭТИ СГТУ имени Гагарина Ю.А.

413100, Россия, Саратовская область г. Энгельс, пл. Свободы, 17

Энгельсский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО «Саратовский  
государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»

(ЭТИ СГТУ имени Гагарина Ю.А.)

8(8453)95-35-53 – тел / факс

<http://techn.sstu.ru> | [eti@techn.sstu.ru](mailto:eti@techn.sstu.ru)

[klinaev@techn.sstu.ru](mailto:klinaev@techn.sstu.ru) | [klinaev51@mail.ru](mailto:klinaev51@mail.ru);

8-927-147-74-52 – моб. [http://techn.sstu.ru/new/private\\_office/AboutMe.aspx?kod=3&kaf=1](http://techn.sstu.ru/new/private_office/AboutMe.aspx?kod=3&kaf=1)