

ОТЗЫВ

официального оппонента д.ф.-м.н., профессора Кузелева Михаила Викторовича о диссертационной работе Глазунова Павла Сергеевича на тему «Распространение электромагнитных волн в плоскостойких средах с неоднородными металлическими пленками», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. Радиофизика.

Основная часть диссертации П.С. Глазунова посвящена разработке нового приближенного подхода к решению линейных волновых уравнений в неоднородных плоскостойких материальных средах. Этот подход применим в тех случаях, когда не работают традиционно используемые приближенные методы, такие как приближение геометрической оптики и метод характеристической матрицы. По этой причине результаты, полученные П.С. Глазуновым в диссертации, обладают несомненной теоретической и практической ценностью.

Основное внимание в диссертации уделено изучению таких неоднородных сред, как тонкие металлические пленки. Проводимость таких пленок значительно изменяется по толщине металла, поэтому пленка является примером плоскостойко-неоднородной материальной среды. Изучение зависимости электродинамических свойств подобных пленок от их толщины, представляет значительный практический интерес. Действительно, нанометровые металлические слои используются в качестве прозрачных электродов, а также детекторов-поглотителей электромагнитного излучения в болометрах и интерферометрах. Для задач проектирования подобных приборов необходима возможность проведения точных расчетов оптических коэффициентов тонких металлических пленок. Все вышесказанное свидетельствует об актуальности и своевременности темы исследования диссертации.

Стоит отметить, что часть материалов диссертации посвящена экспериментальным исследованиям, а именно измерениям оптических коэффициентов нанометровых металлических пленок в СВЧ диапазоне. Немаловажно, что теоретически предсказанный автором диссертации эффект антибликовости тонких пленок наблюдается и в эксперименте. В последней главе диссертации рассматриваются нелинейные эффекты, возникающие при распространении высокоинтенсивных электромагнитных импульсов в плоскостойких средах, содержащих тонкие металлические пленки.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 259 страниц, включая 43 рисунка, 3 таблицы, 289 библиографических ссылок и 12 приложений.

Во введении показывается актуальность темы исследования, ставятся цели и задачи диссертации, определяются предмет и объект исследования, обосновываются научная новизна, практическая и теоретическая значимость работы, излагается методология исследования, формулируются положения, выносимые на защиту, обосновывается достоверность результатов, представляются данные об апробации работы и о публикациях результатов, вошедших в диссертацию.

Глава 1 обзорная. В ней рассматриваются общие особенности металла, как материальной среды. Вводится характерная толщина металлической пленки, при которой коэффициент отражения электромагнитной волны от пленки равен коэффициенту прохождения. Показывается, что в СВЧ диапазоне характерная толщина существенно меньше, чем толщина скин-слоя. Далее в первой главе проводится обзор технических приложений, в которых используются тонкие металлические пленки. Затем проводится обзор моделей проводимости тонких металлических пленок. Принимается, что проводимость пленки определяется известной формулой Друдэ с зависящими от координат параметрами, т.е. является локальной характеристикой. Поэтому, возникает необходимость разработки нового подхода, позволяющего проводить точные расчеты оптических коэффициентов для случая неоднородных слоев.

Начиная с главы 2, автор излагает в диссертации оригинальные результаты исследования. В этой главе разрабатывается новый метод расчета оптических коэффициентов неоднородных плоскостойких сред. Проводится сравнение результатов, полученных при помощи предлагаемого автором метода, с результатами, полученными при помощи других приближенных методов. Далее, предложенный автором метод, применяется к ультратонким металлическим пленкам. Показывается, что в первом приближении все оптические свойства пленки определяются импедансом пленки.

Глава 3 посвящена общему способу описания многослойных оптических структур, состоящих из произвольного числа диэлектрических слоев с напыленными на них металлическими пленками. Обсуждаются преимущества, которые дает предлагаемый подход при проведении практических расчетов. На примере расчетов отдельной тонкой пленки меди демонстрируется, что предлагаемый автором метод приводит к погрешностям расчета оптических коэффициентов не превышающим 1% до частоты 100 ГГц. Также рассматривается структура типа «диэлектрическая подложка с пленками, напыленными на нее с двух сторон». Приводятся графики зависимостей оптических коэффициентов и их погрешностей от толщины напыленных слоев

металла. Показывается, что возможно уменьшение коэффициента отражения от такой оптической системы при правильном подборе толщин напыленных пленок (эффект антибликовости). Рассматриваются также схемы простейших поглотителей, которые могут быть реализованы на основе тонких металлических пленок.

Глава 4 посвящена экспериментальным измерениям проводимости тонких пленок. Проводится описание экспериментальной установки и методов измерения и изготовления металлических пленок. Слои меди и платины напылялись на кварцевые подложки методом термического испарения с магнетронного распыления. Измерения оптических коэффициентов проводились в волноводе на частотах 8.5-12.5 ГГц. Проведено сравнение теоретических и экспериментальных зависимостей проводимости пленок от их толщины, обсуждаются полученные результаты. В том числе приведены экспериментальные зависимости, на которых наблюдается предсказанный теорией эффект антибликовости тонких металлических пленок.

Глава 5 посвящена рассмотрению нелинейных эффектов, которые могут возникать вследствие нагрева тонких пленок. Разработана модель распространения высокоинтенсивных наносекундных импульсов в плоскостной слабопроводящей материальной среде с температурной зависимостью диэлектрической восприимчивости. Проводится вывод системы уравнений в частных производных, описывающих изменение профиля электромагнитного импульса. Показано, что при распространении импульса возникают два конкурирующих нелинейных эффекта: рост пиковой мощности импульса и формирование ударной электромагнитной волны. Затем рассмотрена реализация численной схемы, основанной на дивергентном подходе, которая позволяет проводить моделирование распространения импульса в общем случае. Приведены результаты моделирования, в частности, графики временной зависимости амплитуды, площади и полуширины импульса.

Основная часть диссертации завершается разделом «Заключение», в котором излагаются главные результаты и выводы работы. Далее приводятся список публикаций автора по материалам диссертации и список цитированной литературы.

Диссертационная работа П.С. Глазунова представляет собой законченную научно-квалификационную работу, выполненную на высоком научном уровне. Достоверность теоретических выкладок, представленных в диссертационной работе, подтверждается проведенными численными и физическими экспериментами. Выводы, сделанные автором, согласуются с общими научными принципами, а методы исследования являются апробированными и современными.

Автореферат полно и правильно описывает содержание диссертационной работы.

В качестве основных достоинств диссертации П.С. Глазунова можно выделить следующие:

- подробные обзоры технических приложений, в которых используются тонкие пленки;
- сравнение предлагаемого в диссертации приближенного метода с численными решениями, а также с прочими приближенными подходами;
- подробные выводы формул;
- рассмотрение важных с практической точки зрения конструкций оптических систем, выполненных на основе плоскостойких сред;
- наличие как теоретической, так и экспериментальной части работы, в которой проверяются некоторые из следствий теории;

По диссертации Глазунова П.С. имеется несколько замечаний.

1. Имеющиеся модели расчета проводимости тонких металлических пленок далеко несовершенны и не могут претендовать на высокую точность. В этих условиях разработка более точных методов расчета оптических коэффициентов таких пленок является достижением по большей части теоретическим, чем практическим.
2. Ограничившись в основном тонкими металлическими пленками, автор неоправданно сузил область применимости разработанных им методов расчета оптических коэффициентов. Эти методы великолепно подойдут для исследования слоев неоднородной плазмы газового разряда на поверхностях твердых тел.
3. В условиях, когда толщина пленки мала по сравнению с толщиной скин-слоя, оптические коэффициенты определяются поверхностным током, наведенным в пленке, а распределение электромагнитного поля в толщине пленки никакой роли не играет. Такую пленку можно учесть простыми граничными условиями для тангенциальной составляющей напряженности электрического поля и его производной. Полученные таким способом оптические коэффициенты совпадут с теми, которые получают в первом приближении по методу автора. Об этом бы следовало написать в диссертации. Тем более, что в одной из своих работ автор диссертации метод граничных условий на тонкой пленке рассматривал.

Указанные недостатки, однако, не портят общего положительного впечатления от диссертации. Результаты, представленные в диссертации, несомненно, вносят существенный вклад в теорию распространения

электромагнитных волн в неоднородных плоскостойких средах. Нелинейная модель, предложенная автором, по своей сути, является первой моделью нелинейной длинной линии, в которой учитывается изменение термодинамического состояния нелинейной среды. Полученные результаты актуальны для анализа оптических систем, в состав которых входят тонкие металлические пленки, например, интерферометров, поглотителей электромагнитного излучения, различного рода фильтров. Нелинейная модель распространения импульсов, разработанная автором, также представляется актуальной, так как контролируемое изменение формы импульсов является желаемым для многих приложений. Диссертация поэтому имеет как теоретическую, так и практическую значимость. Основные результаты диссертации, опубликованы в рецензируемых научных журналах и докладывались на российских и международных научных конференциях.

Подводя итоги, можно заключить, что представленная диссертация «Распространение электромагнитных волн в плоскостойких средах с неоднородными металлическими пленками» является законченным научным исследованием. Считаю, что диссертация «Распространение электромагнитных волн в плоскостойких средах с неоднородными металлическими пленками» соответствует специальности 1.3.4. «Радиофизика» (по физико-математическим наукам), а также критериям, определённым пп. 2.1–2.5 «Положения о присуждении учёных степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова», предъявляемым к кандидатским диссертациям, и оформлена согласно приложениям № 8 и 9 «Положения о совете по защите диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова», а её автор — Глазунов Павел Сергеевич – заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. «Радиофизика».

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, профессор,
профессор кафедры физической электроники Физического факультета
Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

_____ Кузелев Михаил Викторович

17.09.2024

119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, МГУ им. М.В.Ломоносова,
д. 1, стр. 2, Физический факультет, к. Ц-64
Телефон: 8(495)939-25-47
E-mail: info@physics.msu.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена
докторская диссертация:
01.04.02 – «Теоретическая и математическая физика» (по физико-
математическим наукам)

Подпись профессора М.В. Кузелева заверяю:
декан Физического факультета МГУ
д.ф. - м.н., профессор

_____ Белокуров В.В.