

ОТЗЫВ

официального оппонента д.ф.-м.н., доцента Козаря Анатолия 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.

В окружающем нас мире по сути своей неравновесном и нелинейном, все основные процессы связаны с передачей информации и энергии. Наиболее существенным (по сравнению с контактными способами) является способ передачи энергии и информации за счет колебательных и волновых процессов. В современной теории колебаний и волн условно можно выделить четыре основные проблемы:

1. Излучение в неоднородной, неравновесной среде (интерференция, дифракция, усиление, параметрические явления и т.п.)
2. Самовозбуждение колебаний в неравновесной среде.
3. Взаимодействие волн с веществом.
4. Прием и регистрация колебаний и волн – проблема, которая актуальна всегда, хотя вряд ли будет когда-либо решена до конца, поскольку непрерывно создаются новые системы приема и регистрации информации, например, для приема гравитационных волн и т.п.

Диссертация П.С. Глазунова выполнена в рамках первой, третьей и четвертой из перечисленных актуальных проблем и посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию взаимодействия электромагнитных волн с плоскостойкими структурами, в состав которых входят тонкие металлические пленки. Их основными физическими характеристиками являются проводимость и оптические коэффициенты отражения, пропускания и поглощения электромагнитной волны. Металлические пленки толщиной от единиц до десятков нанометров представляют собой достаточно сложные системы, поскольку морфология поверхности металла пленки зависит от множества факторов: типа металла, материала подложки, процесса напыления, скорости окисления металла, взаимной диффузии атомов металла и подложки. Ситуация осложняется еще и тем, что при достижении нанометровой толщины в слое металла начинают проявляться размерные эффекты, из-за которых удельная проводимость металла перестает быть постоянной величиной, приобретая некоторый профиль (т.е. начинает изменяться по толщине металла). Правильный учет этих факторов крайне важен для ряда современных технических областей,

в которых требуется напыление многослойных нанометровых структур с заданными свойствами.

В диссертации П.С. Глазунова предлагается новый метод расчета оптических коэффициентов многослойных металл-диэлектрических структур, в котором может быть учтена неоднородность распределения проводимости по толщине металлической пленки. Кроме того, на основании полученных результатов, предлагается новый метод измерения проводимости пленки, который подходит для проведения измерений пространственно-неоднородных образцов. Таким образом, актуальность данной диссертационной работы не вызывает сомнений.

В диссертации кроме того рассматриваются нелинейные эффекты, которые могут происходить при распространении наносекундных электромагнитных видеоимпульсов в слабопоглощающих средах с температурной зависимостью диэлектрической проницаемости. Подобные среды могут быть созданы на основе многослойных систем, в которых однородные слои диэлектрика чередуются с проводящими тонкопленочными структурами.

Представленная диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и библиографии. Общий объём работы составляет 259 страниц, включая 43 рисунка, 3 таблицы, 289 библиографических ссылок и 12 приложений.

Во **введении** показана актуальность темы исследования, поставлены цели и задачи диссертации, определены предмет и объект исследования, обоснованы научная новизна, практическая и теоретическая значимость работы, изложена методология исследования, сформулированы положения, выносимые на защиту, обоснована достоверность результатов, представлены данные об апробации работы и о публикациях результатов, вошедших в диссертацию.

Первая глава диссертации посвящена различного рода обзорам. В §1.1 проводится обзор некоторых фактов, касающихся физических особенностей, характерных для нанометровых металлических слоев. Наиболее интересной особенностью, пожалуй, является то, что при достаточно малой толщине слоя металла все оптические характеристики пленки определяются лишь одним параметром – импедансом, который равен произведению толщины пленки на среднюю (по толщине) удельную проводимость металла пленки. Такие пленки, следовательно, в диапазонах длин волн, где характерная толщина пленки много меньше, чем глубина скин слоя металла, можно рассматривать как частотно независимые сосредоточенные элементы. В §1.2-1.5 проводится обзор технических областей, в которых используются такие пленки. Если речь идет об оптическом диапазоне длин волн, нанометровые пленки актуальны для технологии прозрачных электродов, которые используются при создании жидкокристаллических экранов и сенсорных дисплеев. В терагерцовом и

инфракрасном диапазоне длин волн тонкие пленки часто используются в качестве поглотителей электромагнитного излучения. Здесь крайне важен оптимальный подбор толщины пленки, обеспечивающий максимум коэффициента поглощения. В современных микросхемах и элементах микроэлектроники наноразмерные металлические конструкции также играют важную роль – они используются в качестве токопроводящих дорожек и соединений. В §1.6 проводится обзор теорий проводимости тонких металлических пленок, которые чаще всего фигурируют в современных работах при объяснении экспериментальных данных. В обзоре рассматриваются три модели: модель Томсона, модель Фукса-Зондхаймера, модель Маядеса-Шаткеса-Дженека. Обсуждаются преимущества и недостатки данных моделей, а также области, где они применяются. В §1.7 подводятся итоги главы, еще раз подчеркивается актуальность темы диссертации. Металлические пленки нанометровой толщины используются во множестве технических приложений, где высока цена ошибки проектирования. По этой причине требуется возможность проведения точных расчетов оптических коэффициентов многослойных оптических систем, включающих в свой состав тонкие металлические пленки, а также возможность прецизионных измерений проводимости нанометровых слоев металла. Однако при достижении нанометровых толщин проводимость пленки становится локальной характеристикой, изменяющейся по толщине пленки. В современных работах это обстоятельство не учитывается. Становится очевидной необходимость разработки нового подхода для расчета оптических коэффициентов.

Вторая глава посвящена разработке вышеописанного подхода. В §2.1 проводится постановка задачи рассеяния электромагнитных волн на плоскостойсто-неоднородной структуре, вводится понятие о матрице рассеяния, излагается общий алгоритм нахождения матрицы рассеяния, выводятся формулы, связывающие оптические коэффициенты и матричные элементы матрицы рассеяния. В §2.2 проводится реализация вышеописанного алгоритма при помощи метода Пикара. Матрица рассеяния находится методом последовательных приближений. Доказывается, что если считать, что проводимость пленки не зависит от частоты электромагнитного излучения ω , матрица рассеяния может быть разложена в матричный ряд по степеням ω . Выводятся формулы для погрешностей расчета оптических коэффициентов для N -ого приближения. §2.3 посвящен обобщению теории, изложенной в §2.1-2.2 для случая произвольной системы отсчета. В §2.4 рассматривается первая итерация метода последовательных приближений. Показывается, что в таком случае матрица рассеяния не зависит от частоты электромагнитного излучения и определяется только импедансом пленки. В §2.5 подводятся итоги главы.

Третья глава посвящена обобщению результатов, полученных во второй главе, для случая многослойных структур, состоящих из последовательно расположенных друг за другом однородных диэлектрических слоев и

неоднородных металлических пленок. В §3.1 разработан общий подход для описания подобных структур. Матрица рассеяния всей многослойной структуры может быть получена путем матричного произведения матриц рассеяния каждого из неоднородных слоев. Проводится обобщение формул для погрешностей расчета оптических коэффициентов. Преимущества такого рода обобщения обсуждаются в §3.2. В следующих параграфах рассматриваются примеры расчета оптических коэффициентов для конкретных систем. В §3.3 рассматривается отдельно отстоящая тонкая пленка, выводятся формулы для ее оптических коэффициентов, а также погрешностей их расчета, приводятся соответствующие графики. Показано, что первая итерация метода последовательных приближений для медных пленок толщиной 10 нм вплоть до частоты 100 ГГц приводит к погрешностям расчета оптических коэффициентов менее 1%. В §3.4 аналогичный анализ проведен для системы типа «подложка с двумя напыленными на нее пленками». Обсуждается возможность минимизации коэффициента отражения путем подбора толщин металлических пленок. Этот эффект (эффект антибликовости) детально рассмотрен в §3.5. Еще одной интересной особенностью является то, что из формул для коэффициента отражения R (по интенсивности электромагнитного излучения) для системы «подложка с одной напыленной пленкой» возможно явным образом выразить среднюю по толщине удельную проводимость металла пленки. Это открывает возможность бесконтактного способа измерения проводимости пленки, что детально рассмотрено в §3.6. В §3.7 отмечено, что путем подбора толщин пленок в системе типа «подложка с двумя напыленными на нее пленками» возможно добиться сверхширокополосного 50%-ого поглощения электромагнитных волн. Аналогично в §3.8 рассмотрена схема 100%-ого узкополосного поглотителя. В §3.9 рассмотрено обобщение всей изложенной в третьей главе теории для случая распространения электромагнитных волн в прямоугольном волноводе. В §3.10 подводятся итоги главы.

Четвертая глава посвящена экспериментальной части исследования, а именно измерениям оптических коэффициентов и проводимости тонких пленок меди и платины в частотном диапазоне 8.5-12.5 ГГц. §4.1 посвящен описанию экспериментальной установки и методов измерения. Измерения оптических коэффициентов проводились в волноводе с поперечным сечением 23×10 мм, в который вставлялись кварцевые подложки с толщинами 2, 4, 6 и 8 мм, на которые напылялись пленки. Толщина пленок рассчитывалась по массе распыленного металла. Помимо такого способа расчета толщина пленки измерялась напрямую при помощи стилусного профилометра. В §4.2 проводится сравнение предлагаемого автором диссертации подхода к расчету оптических коэффициентов с традиционно используемым подходом, в котором тонкая пленка заменяется однородным проводящим слоем конечной толщины. Показано, что подход автора приводит к более простым формулам для оптических коэффициентов и именно за счет этого удастся явно выразить

проводимость пленки через оптические коэффициенты системы «подложка с напыленной пленкой». В §4.3 представлены экспериментальные графики зависимостей оптических коэффициентов пленок от толщины, а также графики зависимостей проводимости пленок от толщины, полученные при помощи предложенного автором бесконтактного метода измерения. Отмечено, что в эксперименте явно наблюдался описанный теоретически эффект антибликовости. В §4.4 подводятся итоги главы четыре.

Пятая глава посвящена выявлению новых нелинейных эффектов, которые могут возникать в плоскостойких периодических структурах, включающих в свой состав однородные диэлектрические слои с напыленными на них тонкими металлическими пленками. В §5.1 показано, что в описанных выше структурах нелинейность может возникать в том случае, когда диэлектрическая проницаемость однородных слоев диэлектрика зависит от температуры. Тогда тепловой нагрев металла пленки может приводить (при достаточно большой мощности) к изменению фазовой скорости распространения электромагнитного импульса, из-за чего форма профиля импульса начнет изменяться с течением времени. Проводится вывод основных уравнений, описывающих данный нелинейный механизм. В §5.2 делается ряд предположений относительно свойств материальной среды, которые значительно упрощают нелинейные уравнения. В §5.3 на основе упрощенных уравнений исследуется крайне интересный с практической точки зрения нелинейный эффект – нелинейный рост пиковой мощности импульса. Показано, что для наблюдения такого эффекта необходимо использовать диэлектрик с отрицательным температурным коэффициентом диэлектрической проницаемости. Приводятся примеры материальных сред с подходящими характеристиками. Автор делает вывод, что наилучшим кандидатом является титанат стронция SrTiO_3 . Показано, что характерное значение мощности импульса, которое необходимо для наблюдения вышеописанного нелинейного эффекта при использовании титаната стронция, составляет 0.5 ТВт. В §5.4 упрощенная система нелинейных уравнений решается аналитически в приближении постоянной фазовой скорости. В §5.5 исследуется приближение, в котором нелинейную систему возможно решить численно при помощи классического метода характеристик. В §5.6 для рассмотрения наиболее общего случая предлагается численный метод решения системы нелинейных уравнений. В §5.7-5.8 приводятся результаты моделирования и проводится их обсуждение. Оказывается, что в общем случае возникают два нелинейных эффекта, которые конкурируют между собой. На начальном этапе распространения импульса (при достаточной интенсивности начального импульса) происходит рост его пиковой мощности. Однако зависимость фазовой скорости импульса от температуры среды и величины вектора напряженности электрического поля с течением времени приводит к образованию ударной электромагнитной волны. Ударная волна возникает в определенный момент времени, после чего рост амплитуды импульса

замедляется и сменяется уменьшением амплитуды. Итоги главы подводятся в §5.9. Отмечается, что вышеописанный нелинейный механизм важен для проектирования нелинейных длинных линий, которые часто используются в качестве составных частей генераторов мощных наносекундных видеоимпульсов.

Далее следует раздел «**Заключение**». В нем подводятся итоги проведенного исследования. Полученные в диссертации результаты являются ценными как с теоретической, так и с прикладной точки зрения. С одной стороны, изложенный в работе метод итерационного расчета матрицы рассеяния интересен сам по себе и является существенным вкладом в теорию распространения электромагнитных волн в плоскостойких средах. С другой стороны, этот метод позволяет рассчитывать оптические коэффициенты с заданным значением точности и проводить более детальный анализ оптических систем, что крайне важно для целей их проектирования. Рассмотренные нелинейные эффекты также представляют практический интерес, поскольку увеличение пиковой мощности электромагнитного импульса, а также уменьшение длительности переднего фронта импульса желаемо для многих приложений.

Автореферат соответствует содержанию диссертационной работы.

К достоинствам диссертации, во-первых, можно отнести нацеленность автора на возможное практическое применение полученных результатов.

Во-вторых, можно отметить хорошую структурированность и последовательность изложения материалов диссертации в целом. Наличие в ней множества приложений с одной стороны дополняет основное содержание диссертации, с другой стороны, некоторые весьма сложные математические выкладки также вынесены в отдельные приложения, что облегчает чтение основного материала диссертации.

Подробность вывода всех формул (благодаря которой возможна их непосредственная проверка), выполнение сравнения результатов, полученных при помощи предложенного автором метода с другими приближенными методами (в том числе с численными), а также экспериментальное подтверждение некоторых эффектов, предсказанных автором теоретически, говорят о **достоверности и обоснованности** результатов диссертационной работы.

Предложенный автором оригинальный подход к расчету оптических коэффициентов неоднородных металлических слоев является главным результатом, полученным в данной диссертационной работе. Автору удалось разработать способ приближенного аналитического вычисления элементов матрицы рассеяния, позволяющих проводить расчет оптических коэффициентов

с априори заданной точностью, что делает предложенный метод, для задач рассматриваемого класса, предпочтительнее широко используемых методов Вентцеля — Крамерса — Бриллюэна, характеристической матрицы и импедансных характеристик. Кроме того, автором был предложен новый бесконтактный метод измерения проводимости пленок, лишенный недостатков четырехзондового метода Ван-дер-Пау. Это говорит о **новизне** полученных результатов.

Исследования, выполненные автором, несомненно, обладают **актуальностью**. Действительно, в современных научно-технических работах и статьях используются упрощенные физические модели пленок при расчете их оптических коэффициентов. Чаще всего пленка заменяется однородным проводящим слоем конечной толщины, что, разумеется, является некоторым приближением. При этом остается открытым вопрос, к каким погрешностям приводит это приближение. Подход, разработанный автором, также является приближенным, но он, во-первых, является итеративным, а, во-вторых, позволяет проводить оценки погрешностей расчета оптических коэффициентов N -ой итерации. Поэтому, с точки зрения проектирования точных оптических приборов и систем, в состав которых входят плоскостойкие неоднородные материальные среды, данный подход является эффективным математическим аппаратом, позволяющим проводить расчеты с заданной точностью, необходимые для такого проектирования. Также стоит отметить, что модель нелинейного распространения видеоимпульсов в длинных линиях, предложенная автором, является первой моделью нелинейных длинных линий, в которой учитывается изменение термодинамического состояния нелинейной среды при прохождении через нее электромагнитного импульса. Это открывает возможности для исследования новых нелинейных эффектов, связанных непосредственно с изменением температуры нелинейной среды.

Выводы, сделанные автором, согласуются с результатами работы и общими научными принципами, а методы исследования являются апробированными и современными.

При этом стоит отметить следующие **недостатки** диссертационной работы:

1. Присутствует некоторая путаница в терминологии. Например, в главе 2 автор вводит понятие “матрицы рассеяния” неоднородной среды. Однако затем иногда в тексте (например, на с. 59) фигурирует термин «матрица переноса». Очевидно, что автор считает два этих термина синонимами, однако явно в тексте об этом не написано. Определение N -ого приближения матрицы рассеяния также кажется не очень удачным, поскольку нулевое приближение матрицы рассеяния соответствует первой итерации метода Пикара, первое приближение матрицы рассеяния – второй итерации и т.д.

2. В работе используются приближенные граничные условия в предположении непрерывности поля и его производной на границах пленки без учета наличия на этих границах поверхностных токов. Последнее обстоятельство, наряду с пространственной неоднородностью пленок и частотной дисперсией их показателей преломления, может оказаться причиной существенного различия теоретических и экспериментальных результатов в ИК и в более коротковолновых диапазонах.

3. При изучении нелинейных эффектов в главе 5 автор считает, что нелинейная среда может быть сконструирована на основе чередующихся слоев однородного диэлектрика с напыленными тонкими металлическими пленками. При этом не приводятся конкретные характеристики, которыми должна обладать эта среда (толщиной слоев диэлектрика и напыленных слоев металла, типом металла, характерным значением проводимости и т.д.). В то же самое время известно, что в зависимости от толщины слоев слоистой структуры может существенно измениться ее радиометрический портрет. В целом в диссертации подробно приведены характеристики реальных физических сред и систем, для которых проводятся расчеты. Но отмеченный выше вопрос опущен.

4. При проведении сравнения зависимостей оптических коэффициентов, полученных различными методами (рис. 2.3-2.4), используется модель проводимости Фукса-Зондхаймера. Расчеты проводятся для частот вплоть до $8 \cdot 10^{14}$ Гц. Понятно, что вид профиля проводимости, вообще говоря, зависит от частоты (об этом упомянуто в приложении F). Однако опускается вопрос о том, как именно изменяется профиль проводимости по сравнению со случаем статики. Здесь можно было бы привести графики соответствующих зависимостей.

Отмеченные недостатки не снижают общей высокой оценки выполненных П.С. Глазуновым исследований. Развитые в диссертации методы являются новыми и оригинальными, а полученные в ходе исследований результаты имеют как теоретическую, так и практическую значимость. Результаты диссертации опубликованы в рецензируемых научных журналах и докладывались на российских и международных научных конференциях.

Оценивая работу в целом, можно заключить, что представленная диссертация «Распространение электромагнитных волн в плоскостойких средах с неоднородными металлическими пленками», представляет собой законченное научное исследование. 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, определенным 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, доцент,
профессор кафедры фотоники и физики микроволн физического факультета
Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

_____ Козарь Анатолий Викторович

Дата составления отзыва: 25 сентября 2024 года.

119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, МГУ имени М.В. Ломоносова,
д. 1, стр. 2, физический факультет, комн. 2-77
Телефон: 8 (495) 939-27-75
E-mail: avk@phys.msu.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена

докторская диссертация:

01.04.03 — «Радиофизика» (по физико-математическим наукам)

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Московский государственный университет
имени М.В. Ломоносова», физический факультет
Телефон: +7 (495) 939-16-82 E-mail: info@physics.msu.ru

Подпись Козаря Анатолия Викторовича ЗАВЕРЯЮ:

и.о. декана физического факультета

МГУ имени М.В. Ломоносова

д.ф.-м.н., профессор

_____ Белокуров В.В.