

ОТЗЫВ

официального оппонента к.ф.-м.н. Бочкарева Сергея Геннадьевича 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.

Диссертационная работа П.С. Глазунова посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию свойств нанометровых металлических пленок, в частности, изучению удельной проводимости металла пленки от толщины его слоя, а также оптических коэффициентов пленок в СВЧ диапазоне.

Технология напыления наноразмерных металлических слоев с заданными характеристиками является актуальной для ряда современных прикладных задач. Во-первых, тонкие металлические пленки могут играть роль прозрачных электродов, используемых в жидкокристаллических экранах, сенсорных дисплеях, а также солнечных батареях. В настоящее время большинство прозрачных электродов изготавливается на основе индия-олова. Однако данный материал обладает рядом существенных недостатков, таких как исчерпаемость, дороговизна и необходимость отжига при достаточно высокой температуре. По этой причине технология изготовления прозрачных электродов на основе материалов, альтернативных оксиду индия олова, с каждым годом будет становиться все более востребованной. Во-вторых, на основе тонких металлических пленок могут быть реализованы уникальные поглотители электромагнитного излучения. Известным фактом является то, что при фиксированной толщине плоскостойкого поглотителя невозможно достичь сколь угодно широкой полосы поглощения. Однако частотно-избирательные поверхности, сконструированные на основе тонких металлических пленок, позволяют наилучшим образом оптимизировать толщину поглотителя и ширину полосы его поглощения. В-третьих, проектирование больших интегральных схем тесно связано с оптимизацией их топологии. Например, для уменьшения паразитной RC-задержки необходима оптимизация геометрии наноразмерных соединительных контактов и проводящих дорожек.

В нанометровых слоях металла, однако, в полной мере проявляются размерные эффекты, вследствие которых удельная проводимость металла становится локальной характеристикой, изменяющейся по толщине. В современных статьях и работах последнее обстоятельство не учитывается: тонкая пленка моделируется либо при помощи однородного проводящего слоя конечной толщины, либо при помощи бесконечно тонкого импедансного слоя. Автор данной диссертационной работы разрабатывает аналитический метод, позволяющий рассчитывать оптические коэффициенты неоднородных металлических слоев с произвольной зависимостью удельной проводимости по толщине. Таким образом, актуальность данной диссертационной работы очевидна. Стоит отметить, что в диссертации также рассматриваются нелинейные эффекты, связанные с нагревом металла пленок. При рассмотрении нелинейных эффектов автор приводит конкретные примеры установок, в

которых данные эффекты теоретически могут наблюдаться. Это делает результаты диссертации особо ценными.

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 вводная, она служит для ознакомления читателя с темой исследования. В §1.1 обсуждается вопрос о том, при каких толщинах слой металла начинает терять зеркальные свойства, а также рассматриваются характерные особенности макроскопически тонких слоев металла. В §1.2-1.5 проводится обзор современных областей прикладной науки, в которых используются нанометровые металлические структуры. Из обзора следует, что можно выделить три главных направления. Во-первых, – технология прозрачных электродов, во-вторых, – поглотители и детекторы электромагнитного излучения, наконец, в-третьих, – наноразмерные металлические контакты в интегральных микросхемах. В §1.6 проводится обзор современного состояния теории проводимости тонких металлических пленок. С уменьшениями толщины слоя металла уменьшается его удельная проводимость. Считается, что это связано по крайней мере с тремя размерными эффектами: внешним, внутренним и квантовым. Размерные эффекты приводят к тому, что удельная проводимость металла пленки становится локальной характеристикой, зависящей от толщины пленки и пространственных координат. Итоги первой главы сформулированы в §1.7. В последующих главах излагаются только оригинальные результаты исследования.

Во **второй главе** проводится разработка приближенного подхода к решению волнового уравнения в неоднородной плоскостройной материальной среде. В §2.1 проводится постановка задачи рассеяния электромагнитной волны на неоднородной среде конечной толщины, вводится определение матрицы рассеяния плоскостройной среды. В §2.2 поставленная задача решается при помощи метода последовательных приближений Пикара. Доказывается, что матрица рассеяния может быть разложена в матричный ряд по степеням частоты излучения электромагнитного поля. В §2.3 рассматривается то, как связаны выражения для матриц рассеяния в двух различных системах отсчета. В §2.4 выводится выражение для матрицы рассеяния для случая тонких металлических пленок.

В **третьей главе** результаты, полученные автором во второй главе, обобщаются для случая многослойных плоскостройных структур, в которых неоднородные металлические слои чередуются с однородными слоями диэлектрика. В §3.1 выводится формула для матрицы рассеяния вышеописанной

многослойной структуры. В §3.2 обсуждаются преимущества предлагаемого подхода. В §3.3 выводится формула для матрицы рассеяния металлической пленки, нанесенной на тонкую диэлектрическую пленку. Рассмотрение подобной системы важно с практической точки зрения, поскольку отдельно отстоящие металлические пленки крайне сложны в изготовлении. Компромиссным решением этой проблемы является напыление металла на тонкую диэлектрическую подложку. В §3.4 рассматривается еще одна система, весьма часто используемая на практике: «диэлектрическая подложка с пленками, напыленными на нее с двух сторон». В этом же параграфе выводятся формулы для коэффициентов отражения r и прохождения t (по амплитуде электромагнитного поля) для такой системы. Из данных формул, как показал автор, следует наличие минимума в зависимости модуля коэффициента отражения $|r|$ от толщины слоя напыленного на подложку металла. Этот эффект (эффект антибликовости) рассмотрен в §3.5. В §3.6 показано, что формулы для коэффициента отражения r позволяют явно выразить проводимость пленки. Поэтому оказывается возможным проводить бесконтактные измерения проводимости пленки. В §3.7 рассмотрена конструкция сверхширокополосного 50%-ого поглотителя, а в §3.8 – узкополосного 100%-ого поглотителя на основе тонких пленок. В §3.9 автор проводит обобщение теории второй и третьей глав на случай волноводного распространения (для волны моды TE_{10}). В §3.10 подводятся итоги главы.

Четвертая глава полностью посвящена экспериментальной составляющей работы. В §4.1 проводится описание характеристик экспериментальной установки, на которой проводилось измерение оптических коэффициентов тонких пленок в СВЧ диапазоне, а также описание напылительной установки и условий, при которых проводилось напыление. В §4.2 детально объясняются преимущества, приближенного подхода, предлагаемого автором, по сравнению с традиционно используемой в литературе моделью однородных слоев. В §4.3 приводятся экспериментальные графики: зависимости оптических коэффициентов пленок от их толщины, а также зависимости проводимости пленок от толщины, полученные при помощи нового бесконтактного способа измерения. В §4.4 подводятся итоги главы.

В пятой главе теоретически исследуются нелинейные эффекты, возникающие при распространении наносекундных электромагнитных видеоимпульсов достаточно большой интенсивности в плоскостойких средах, состоящих из тонких металлических пленок с чередующимися однородными диэлектрическими слоями. В §5.1 проводится вывод основных уравнений, описывающих распространение импульса в таких средах. Показано, что при наличии температурной зависимости диэлектрической восприимчивости слоев диэлектрика увеличение температуры в такой среде приводит к нелинейному искажению формы импульса. В §5.2 делается ряд упрощений, позволяющий свести систему уравнений Максвелла вместе с уравнением теплопроводности к нелинейному уравнению переноса. В §5.3 показано, что существует нелинейный режим, при котором возникает эффект роста пиковой мощности импульса. Это имеет место, когда амплитуда электрического поля начального видеоимпульса E_0 превышает некоторое пороговое значение. В §5.4 автор использует

приближение постоянной фазовой скорости для получения аналитического решения нелинейного уравнения, а в §5.5 – приближение, в котором нелинейное уравнение возможно решить методом характеристик. Для рассмотрения более общих случаев в §5.6 была разработана численная схема, позволяющая решать нелинейное уравнение методом конечных разностей. В §5.7-5.8 приведены результаты моделирования, проводится их обсуждение. В §5.9 сформулированы итоги главы.

Основное изложение диссертации завершается разделом «**Заключение**», где приведены основные результаты и выводы. Полученные результаты имеют как теоретическую, так и практическую значимость, поскольку они могут быть использованы при проектировании линейных оптических систем с поглотителями, а также для разработки нелинейных длинных линий, входящих в состав высоковольтных генераторов наносекундных видеоимпульсов.

Автореферат соответствует содержанию диссертационной работы.

Достоинством диссертации является то, что в ней подробно изложены теоретические выкладки, много внимания уделено рассмотрению именно тех плоскостных систем, которые важны с практической точки зрения. При изучении нелинейных эффектов расчеты приведены для конкретных установок и материальных сред, где они потенциально могут наблюдаться.

Совпадение результатов, полученных на основе предлагаемого автором приближенного подхода, с результатами численного моделирования, а также экспериментальное наблюдение некоторых предсказанных теоретически эффектов говорят о **достоверности** выводов работы.

Предложенный автором новый бесконтактный метод измерения проводимости тонких металлических пленок, а также открытие эффекта антибликовости тонких пленок свидетельствуют о **новизне** полученных результатов.

Актуальность выполненных автором исследований не вызывает сомнений. Во-первых, разработанный приближенный подход позволяет рассчитывать оптические коэффициенты неоднородных металлических слоев для произвольных зависимостей профиля проводимости по толщине, а кроме того проводить расчеты с априори заданной точностью. Во-вторых, данный подход работает в случаях, когда традиционно используемые методы оказываются неприменимыми. В-третьих, предложенный автором бесконтактный способ измерения проводимости тонких металлических пленок позволяет полностью исключить влияние на измерения сторонних факторов, таких, например, как воздействие высоких температур на поверхность пленки и ее окисление.

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

При этом необходимо отметить, что диссертационная работа не лишена **недостатков**:

1. В главе 5 исследуются нелинейные эффекты при распространении видеоимпульса с применением метода редуцированного уравнения Р.В.

Хохлова (параграф 5.2). В тексте диссертации автор приводит ссылку [170] на обзор С.А. Ахманова в УФН, где изложен общий метод Хохлова, однако, в данном обзоре отсутствует вывод редуционного уравнения. В диссертации, где в целом подробно приводятся теоретические выкладки, логично привести явный вывод редуционного уравнения (фактически уравнения (5.28)) из волнового уравнения.

2. Продолжая обсуждение теоретической модели нелинейного распространения мощного видеоимпульса, отмечу, что в диссертации стоило бы обсудить насколько существенно зависимость проводимости рассматриваемой плоскостной среды от температуры. В начале главы 5 на стр. 112 автор пишет: «Увеличение температуры среды приводит к изменению её электромагнитных характеристик: проводимости и диэлектрической проницаемости». Но, далее на стр. 117, фактически предполагается, что проводимость не зависит от температуры. С последним утверждением вполне можно было бы согласиться, если бы автор привел оценки или показал это на примере, аналогично тому, как обсуждаются примеры материальных сред, обладающих отрицательным температурным коэффициентом диэлектрической проницаемости в гигагерцовом диапазоне частот (см табл. 5.1, стр. 124).
3. В тексте диссертации можно найти переменные или постоянные, которые обозначаются одинаково, хотя в большинстве случаев явно указано, о какой величине тут идет речь. Например, химический потенциал при абсолютном нуле (см. стр. 198, приложение Е) и магнитная постоянная μ_0 , которая определена на стр. 16 и регулярно применяется в тексте, обозначены одинаково.

Отмеченные недостатки относятся скорее к тексту диссертации и не снижают общей высокой оценки выполненных П.С. Глазуновым исследований. Автор представил в диссертации абсолютно новый теоретический материал, посвященный теории распространения электромагнитных волн в неоднородных плоскостных средах. Основной материал диссертации дополнен множеством приложений как общего обзорного характера, так и приложениями, касающимися вывода главных положений разработанного в диссертации подхода. Разработанные в диссертации методы являются оригинальными, а полученные в ходе исследований результаты имеют как научное, так и практическое значение. Основные результаты, лежащие в основе 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 плоскостных средах с неоднородными металлическими пленками», представляет собой законченное научное исследование. Считаю, что диссертация Глазунова П.С. «Распространение электромагнитных волн в плоскостных средах с неоднородными металлическими пленками» полностью 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:

кандидат физико-математических наук,
высококвалифицированный старший научный сотрудник сектора лазерно-плазменной физики высоких энергий отдела лазерной плазмы Физического института имени П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН)

_____ Бочкарев Сергей Геннадьевич

Дата составления отзыва: 18 сентября 2024 года.

119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинский проспект, д. 53, стр. 1, комн. 230
Телефон: +7 (499) 132-68-36
E-mail: bochkarevsg@lebedev.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена кандидатская диссертация:
01.04.21 — «Лазерная физика» (по физико-математическим наукам)

Адрес места работы:
119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинский проспект, д. 53, стр. 1
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
«Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук» (ФИАН)

Телефон: +7 (499) 132-65-54; +7 (499) 135-14-29; e-mail: office@lebedev.ru

Подпись Бочкарева Сергея Геннадьевича ЗАВЕРЯЮ:

Учёный секретарь ФИАН
к.ф.-м.н.

_____ Колобов А.В.