

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА ЮФУ801.01.08,
созданного на базе физического факультета федерального государственного
автономного образовательного учреждения высшего образования

«Южный федеральный университет»,

по диссертации на соискание ученой степени кандидата наук

аттестационное дело № _____,

решение диссертационного совета от 29.09.2023 г. № 6

О присуждении Черепанову Владимиру Владимировичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация **«Электродинамический анализ плазменных устройств на основе графена в ТГц и ИК диапазоне»** по специальности 1.3.4. Радиофизика принята к защите 21.07.2023 (протокол заседания № 5) диссертационным советом ЮФУ801.01.08, созданным на базе физического факультета федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет» в соответствии с приказом № 265-ОД от 19.09.2023 г.

Соискатель Черепанов Владимир Владимирович, 1989 года рождения, в 2011 г. окончил специалитет Южного федерального университета по направлению подготовки «Радиофизика» и с 2012 г. по 2019 г. работал в ростовском НИИ Радиосвязи. В 2019 г. поступил в аспирантуру федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет» по направлению 03.06.01 Физика и астрономия, направленность Радиофизика, где и продолжает свое обучение на 4 курсе. Кроме этого, преподает и работает по совместительству ассистентом на физическом факультете.

Диссертация выполнена на физическом факультете федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, профессор Лерер Александр Михайлович, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», физический факультет, кафедра прикладной электродинамики и компьютерного моделирования, профессор.

Официальные оппоненты: Таран Владимир Николаевич – доктор физико-математических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения», факультет «Информационные технологии управления», кафедра "Связь на железнодорожном транспорте", профессор; Звездина Марина Юрьевна – доктор физико-математических наук, доцент, ФГУП «Ростовский-на-Дону научно-исследовательский институт радиосвязи» Федеральный научно-производственный центр, отдел подготовки кадров высшей квалификации, ведущий научный сотрудник; **дали положительные отзывы на диссертацию.**

Соискатель имеет **24** опубликованные работы по теме диссертации, из них в научных изданиях, входящих в Перечень научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, представленных для защиты в диссертационные советы Южного федерального университета, опубликовано **5** работ; в научных изданиях, входящих в базы данных международных индексов научного цитирования Scopus и/или Web of Science, опубликовано **14** работ. Наиболее значимые работы:

1. В.В. Черепанов Нелинейная поверхностная проводимость графена: формулы и экспериментальные данные // Физические основы приборостроения. 2020. Т. 9, № 4(38). С. 2-17.
2. А.М. Лерер, И.Н. Иванова, Г.С. Макеева, В.В. Черепанов. Оптимизация параметров и характеристик широкополосных терагерцевых поглотителей на основе 2d-решеток графеновых лент на многослойных подложках // Оптика и спектроскопия. 2021. Т. 129, № 3. С. 342-349.
3. А.М. Лерер, Г.С. Макеева, В.В. Черепанов. Генерация третьей гармоники

терагерцовых волн нелинейной графеновой многослойной метаповерхностью // Оптика и спектроскопия. 2021. Т. 129, № 1. С. 89-91.

4. А.М. Лерер, Г.С. Макеева, В.В. Черепанов. Нелинейное взаимодействие терагерцовых волн с наноструктурированным графеном в резонансных многослойных плазмонных структурах // Радиотехника и электроника. 2021. Т. 66, № 6. С. 543-551.

5. А.М. Лерер, Г.С. Макеева, В.В. Черепанов. Преобразователи частоты терагерцового и инфракрасного диапазонов на основе двумерно-периодических графеновых решеток // Радиотехника и электроника. 2023. Т. 68, № 1. С. 30-36.

На диссертацию и автореферат поступило 17 отзывов. Все отзывы положительные. В них отмечается научная новизна, актуальность и практическая значимость работы. В некоторых отзывах авторы отмечают незначительные недостатки:

1. Д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник НИО-3 ПАО «Радиофизика» **Скобелев Сергей Петрович** отметил: 1) Относительная мощность, поглощенная в структурах, рассчитывается в диссертации с использованием соотношения энергетического баланса, а также отраженной и прошедшей мощности, рассчитанной с помощью разработанных алгоритмов. Было бы интересно узнать, позволяют ли разработанные алгоритмы определять поглощенную мощность без использования соотношения энергетического баланса, чтобы указанное соотношение затем использовать в качестве еще одного способа проверки работы алгоритмов. 2) Поскольку новые алгоритмы разрабатываются в диссертации в качестве более эффективных средств по сравнению с коммерческими пакетами общего назначения, то было бы уместным привести сравнения их эффективности на каком-либо примере, что не упоминается в автореферате.

2. Д.ф.-м.н., член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник Института физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук **Ринкевич Анатолий Брониславович** отметил: 1) На стр.3 использовано неудачное выражение, о том, “что графен обладает

исключительно высокой нелинейностью, которая на сегодняшний день является самой сильной из всех известных электронных материалов”. Как автор может измерить “силу” нелинейности? 2) На стр.14 говорится об угловой нечувствительности поглощения системы графеновых решеток со ссылкой на рис.5. Однако на рис.5 нет сведений об угловой зависимости поглощения.

3. Д.ф-м.н., профессор кафедры радиотехники и электродинамики Института физики ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» **Давидович Михаил Владимирович** отметил: 1) Не учтена пространственная дисперсия, которая проявляется, начиная с ТГц диапазона. 2) При рассмотрении графеновых нанолент и графеновых элементов (кластеров) следует использовать строгие квантовые модели, включая модели проводимости, которые должны зависеть от DOS (density of states) и конфигурации краев.

4. Д.ф-м.н., профессор, академик российской академии естествознания (РАЕ), профессор кафедры Математических и естественно-научных дисциплин ЧОУ ВО «Московский университет имени С.Ю. Витте» **Геворкян Эдуард Аршавирович** отметил: 1) Желательно было бы более тщательно отредактировать текст автореферата.

5. Д.ф-м.н., доцент кафедры антенн и радиопередающих устройств, заместитель директора по научной работе по информационно-вычислительным технологиям ФГБУН «Институт теоретической и прикладной электродинамики РАН» **Кисель Владимир Николаевич** отметил: 1) В работе имеются стилистические погрешности («поглотители с угловой нечувствительностью» - стр.5, «повышение ширины полосы максимального поглощения» - стр.13 и т.п.), а также отдельные случаи неточного использования терминологии. 2) Так, при построении модели автор декларирует использование импедансных граничных условий (ИГУ), хотя по сути применяет классические граничные условия резистивного типа, связывающие ток и напряженность электрического поля и пригодные для описания тонкослойных структур (в отличие от традиционных ИГУ, которые устанавливают связь между касательными

компонентами электрического и магнитного полей на поверхности тела и применяются для описания объемных, как правило, непрозрачных объектов). 3) Не очень понятно, как в рамках (линейной) модели учитываются диэлектрические проницаемости слоев многослойной структуры (рис. 2, стр. 10-11). 4) При описании решения нелинейной задачи методом возмущений (глава 2) справедливо предполагается, что параметр нелинейности мал (стр. 12), в то же время при описании результатов исследований (глава 3) отмечается, что возможно увеличение уровня третьей гармоники на несколько порядков (стр. 14), и возникает вопрос, а обеспечивает ли метод возмущений в этом случае достаточную точность?

6. Д.т.н., профессор кафедры Радиоэлектроника и телекоммуникации Института электронной техники и приборостроения, ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.» **Комаров Вячеслав Вячеславович** отметил: 1) К автореферату имеется замечание, касающееся возможности практической реализации рассмотренных в работе дифракционных решеток. Процесс нанесения графена и структурирования его в виде решеток, отверстий и лент достаточно сложный, поэтому создание многослойной решетки с повторяемостью характеристик находится под вопросом.

7. Д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Радиоэлектронные системы и технологии» Института радиоэлектроники и информационной безопасности ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет» **Афонин Игорь Леонидович** отметил: 1) На рис. 5 указаны не все параметры поглотителя, что затрудняет проверку полученных спектров. 2) В названии необходимо использовать множественное число, а именно, диапазонов, т.к. речь идет о двух диапазонах.

8. Д.т.н., начальник отдела научно-исследовательских работ и перспективных исследований АО «НПО Лавочкина» **Сысоев Валентин Константинович** отметил: 1) В автореферате не приводятся сведения о работах других исследователей в этой области, что затрудняет понимание места данного

диссертационного исследования. 2) Автор не приводит технологические параметры графеновых лент (марка, геометрические параметры и т.д.) и других структур, а это необходимо для оценки возможностей будущих приборов.

9. Д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой «Математика и суперкомпьютерное моделирование» ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет» **Смирнов Юрий Геннадьевич** отметил: 1) В автореферате не указано, была ли исследована сходимость предложенного численного метода. 2) В автореферате нет оценки для решения нелинейной задачи методом возмущений.

10. Д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой физики и информационных систем физико-технического факультета ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет» **Богатов Николай Маркович** отметил: 1) В автореферате используется параметр τ - время релаксации графена. В тексте не обсуждаются механизмы релаксации, например, решёточная, электронная, по энергии, по импульсу и т.п., не ясно, как значение параметра τ влияет на рассчитанные зависимости.

11. Д.ф.-м.н., заведующий кафедры радиопизики и электроники ФТИ, ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского», доцент **Мазин Алим Сеит-Аметович** отметил: 1) В автореферате отсутствуют экспериментальные корреляции с полученными модельными результатами. Например, в представлении первой главы диссертации на странице 10 говорится: «Теоретически предсказано и экспериментально доказано, что графен проявляет выраженный нелинейный отклик ...», при этом не понятно принадлежность автора к этим результатам.

12. Д.т.н., профессор, ведущий научный сотрудник АО «ВНИИ «Градиент», **Булычев Юрий Гурьевич**, отметил: 1) Рассмотрение автореферата показало, что в нем отсутствует описание возможности практической реализации разработанных структур. 2) К отдельным замечаниям автореферата можно отнести орфографические и стилистические погрешности (стр. 4, 13).

13. К.т.н., доцент, начальник 204 кафедры радиотехники и антенно-фидерных

устройств ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» **Паринов Максим Леонидович**, отметил: 1) Формулировка научной новизны в автореферате приведена не в отличительной форме, что затрудняет оценку положений, выносимых на защиту. 2) Не ясно, есть ли ограничения применимости предложенных аналитических моделей. 3) Не ясно, проводилась ли экспериментальное подтверждение расчетных результатов.

14. Д.т.н., профессор кафедры микроволновой электроники СПбГЭТУ "ЛЭТИ" **Григорьев Андрей Дмитриевич** отметил: 1) К сожалению, в автореферате отсутствуют данные по верификации предложенных моделей и программ сравнением с экспериментальными результатами или результатами, полученными другими исследователями. 2) На некоторых графиках, например, Рис.4, 5, 9, 11 отсутствуют единицы измерения по оси ординат.

Отзывы заслуженного деятеля науки РФ, д.ф.-м.н., профессора, главного научного сотрудника ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН **Кравченко Виктора Филипповича**; д.ф.-м.н., профессора кафедры «Высшая и прикладная математика» ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет» **Бойкова Ильи Владимировича**, д.ф.-м.н., доцента, профессора кафедры «Кибербезопасность информационных систем» факультета «Информатика и вычислительная техника» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» **Черкесовой Ларисы Владимировны** – без замечаний.

Выбор официальных оппонентов обосновывается тем, что **Таран В. Н.** является ведущим специалистом в области прикладной электродинамики СВЧ диапазона и математических методов анализа решения краевых и дифракционных задач; **Звездина М.Ю.** имеет высокую квалификацию в области моделирования и визуализации электродинамических процессов в сложных устройствах микроволнового, суб-ТГц, ТГц и ИК диапазонов, в частности на основе графена. Выбранные оппоненты имеют публикации в авторитетных рецензируемых научных изданиях по теме диссертации, а также обладают возможностью дать объективные обоснования и оценку всех аспектов

диссертационной работы.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований: созданы численно-аналитические методы трехмерного электродинамического моделирования плазмонных, в том числе графеновых нано и микроструктур; **разработаны и численно реализованы** математические модели решения линейной и нелинейной задачи дифракции электромагнитных волн на двумерно-периодических структурах, содержащих произвольное число диэлектрических, металлических, графеновых, плазмонных слоев и включений; при решении линейной задачи дифракции **предложено** применение импедансных граничных условий и базиса, учитывающего особенности распределения тока в тонких плазмонных лентах; для решения нелинейной задачи **обосновано** применение метода возмущения совместно с нелинейной проводимостью третьего порядка графена; на основе полученной математической модели исследованы линейные спектры рассеяния электромагнитных волн ТГц и ИК диапазонов, а также нелинейные спектры генерации на частоте третьей гармоники и комбинационных частотах в задаче смещения и **выявлены условия** резонансного увеличения коэффициента поглощения падающего поля и уровня генерируемых гармоник; **предложены** способы дополнительного усиления перечисленных эффектов для моделирования высокоэффективных поглотителей, генераторов и преобразователей частот ТГц и ИК диапазонов.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что разработанные алгоритмы решения линейной и нелинейной задач дифракции являются универсальными, имеют быструю внутреннюю сходимость и малое время расчетов, небольшие требования к компьютерным ресурсам и позволяют проводить большой объем исследований радиофизических свойств многослойных многоэлементных метаповерхностей на основе плазмонных дифракционных решеток. Быстрая сходимость решения обеспечена применением полиномов Лежандра и Гегенбауэра в разложении тока в графеновых лентах или полиномов Чебышева первого и второго рода для

идеально проводящих полосок. **Исследовано** влияние параметров элементарной ячейки решетки на линейную и нелинейную дифракцию и **предложены** механизмы усиления взаимодействия электромагнитных волн с решеткой и увеличения генерируемой мощности на частоте третьей гармоники и комбинационных частотах и способ управления параметрами плазмонных устройств на основе графена без изменения геометрии.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики: разработанные математические модели численно реализованы в среде MS Visual Studio, позволяющие моделировать процессы линейной и нелинейной дифракции ЭМВ ТГц и ИК диапазона на бесконечных решетках прямоугольной формы, содержащих графен и другие плазмонные материалы. Ключевым преимуществом разработанных программ является возможность быстрого расчета (в сравнении с коммерческими пакетами на основе сеточного разбиения пространства электродинамической задачи) параметров ДР с большим количеством элементов и слоев: линейных спектров рассеяния ЭМВ для разработки поглотителей и поляризаторов, нелинейных спектров генерации на частоте третьей гармоники и на комбинационных частотах для разработки генераторов третьей гармоники и преобразователей частот (смесителей, устройств визуализации ТГц излучения, генераторов ТГц волн, модуляторов). Улучшены характеристики перечисленных устройств за счет выбора рабочей частоты возле резонанса ППП основной и высших мод; увеличения количества слоев графен – диэлектрик; оптимизации толщины разделительных диэлектриков и использование эффекта стоячих волн; применения металлических и многослойных диэлектрических зеркал.

Результаты диссертационной работы были использованы при выполнении государственного задания в сфере научной деятельности научного проекта № (0852-2020-0032)/(БАЗ0110/20-3-07ИФ) «Экологически чистые материалы для инновационных multifunctional систем: от цифрового дизайна к производственным технологиям».

Оценка достоверности результатов исследования обоснована строгой

постановкой электродинамической задачи, а также проведенной верификацией результатов расчета в линейном режиме сравнением с методом на основе объемных интегро-дифференциальных уравнений для двумерного и одномерного случаев дифракционных решеток на основе графена. Для нелинейной дифракции приведена оценка погрешности метода возмущения.

Личный вклад соискателя состоит в том, что им самостоятельно были выполнены все представленные теоретические исследования дифракционных решеток на основе графена. Проведен анализ полученных результатов, выявлены закономерности влияния параметров решеток на линейные и нелинейные спектры и предложены способы усиления взаимодействия электромагнитных волн с решеткой и увеличения генерируемой мощности на частоте третьей гармоники и комбинационных частотах в задаче смещения. Соискатель принимал непосредственное участие в создании и модификации существующих программ для расчета характеристик дифракционных решеток на основе графена в нелинейном режиме.

На заседании 29.09.2023 диссертационный совет отметил, что рассматриваемая диссертация соответствует критериям п. 2. «Положения о присуждении ученых степеней в федеральном государственном автономном учреждении высшего образования «Южный федеральный университет» от 30 ноября 2021г. №260-ОД, и принял решение присудить Черепанову Владимиру Владимировичу учёную степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 8 человек, из них 7 докторов наук по специальности 1.3.4. Радиофизика, участвовавших в заседании, из 11 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за 8, против «нет», недействительных бюллетеней «нет».

Председатель диссертационного
совета

Заргано Г.Ф.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Губский Д.С.

