

ОТЗЫВ
официального оппонента
на диссертационную работу Игонина Семена Владимировича
«Управление электрофизическими и электродинамическими параметрами
композитных материалов с магнитными наночастицами и углеродными
наноструктурами», представленную на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук по специальностям
2.2.2. – Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники,
квантовых устройств и 1.3.4. – Радиофизика

Композитные материалы представляют собой гетерофазные системы, состоящие из двух или более компонентов. Изменяя объёмное соотношение компонентов, можно управлять свойствами композитных материалов в соответствии с конкретными требованиями. Современные композитные материалы с диэлектрической матрицей находят широкое применение в СВЧ технике, микро- и нанoeлектронике. При этом создание композитных материалов с заданными электрофизическими характеристиками остаётся актуальной научной задачей.

Композитные материалы, содержащие углеродные наноструктуры, могут быть использованы для создания оптоэлектронных устройств и покрытий, поглощающих СВЧ излучение. Особый интерес вызывает возможность управления электрофизическими параметрами композитов с углеродными наноструктурами. Одним из наиболее перспективных направлений для достижения этой цели является использование магнитных жидкостей (МЖ), представляющих собой суспензию из магнитных однодоменных наночастиц. Во внешнем магнитном поле в МЖ могут образовываться агломераты из магнитных наночастиц. Свойства композитов с полимерной матрицей и МЖ зависят от концентрации МЖ и могут изменяться в зависимости от величины магнитного поля. При этом введение в матрицу углеродных наноструктур может существенно изменить электрофизические параметры таких волокнистых композитов.

Таким образом, тема диссертационной работы Игонина С.В., посвящённой экспериментальному и теоретическому исследованию особенностей взаимодействия электромагнитного излучения оптического и СВЧ диапазонов с композитными материалами, содержащими магнитные наночастицы и углеродные наноструктуры, является весьма актуальной.

Диссертация Игонина С.В. написана хорошим литературным языком, текст изложен на высоком научном уровне. Работа хорошо структурирована, материал представлен последовательно и логично. Диссертация состоит из введения, четырёх разделов, заключения и списка использованной литературы. Работа

изложена на 146 страницах, включая 45 рисунков и 7 таблиц. Список литературы содержит 172 наименования.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, приведены основные положения, выносимые на защиту, отмечены научная новизна и практическая значимость результатов. Также обоснована достоверность полученных результатов, содержатся сведения об апробации работы и личном вкладе автора.

В первом разделе диссертационной работы представлен обзор литературных данных, посвящённых исследованиям композитных материалов, содержащих углеродные нанотрубки (УНТ). Проведён подробный анализ работ по исследованиям СВЧ свойств композитных материалов с УНТ. Проанализированы процессы образования агломератов из магнитных наночастиц в МЖ и изучены возможности управления электрофизическими параметрами композитных материалов с использованием МЖ. Проведён анализ теоретических моделей для расчётов электрофизических параметров композитных материалов с УНТ, а также представлен обзор методов измерений электрофизических параметров композитных материалов.

Во втором разделе представлены результаты экспериментальных исследований модуляции мощности линейно поляризованного лазерного излучения, прошедшего через композитные материалы, содержащие МЖ. Продемонстрировано, что увеличение длины волны лазерного излучения и величины магнитного поля приводит к росту глубины модуляции поляризованного излучения. Установлено, что добавление УНТ в композитный материал приводит к росту глубины модуляции примерно в полтора раза.

Экспериментально исследованы амплитудно-частотные характеристики коэффициента отражения электромагнитного излучения в СВЧ диапазоне от одномерного фотонного кристалла, в центральном слое которого располагался композит эпоксидная смола (ЭС)/МЖ. Установлено, что увеличение магнитного поля сначала подавляет дефектную моду, а последующее увеличение поля приводит к восстановлению этой моды. Такой немонотонный характер влияния магнитного поля связан с эффективным поглощением СВЧ излучения магнитными наночастицами при возникновении ферромагнитного резонанса на частоте дефектной моды. Исследовано влияние объёмной доли МЖ в композите на управляемость характеристиками фотонной структуры.

Третий раздел посвящён результатам экспериментальных исследований электрофизических параметров композитов ЭС/МЖ/УНТ в СВЧ диапазоне. Показано, что при полимеризации в магнитном поле в объёме композита

образуются нитевидные структуры из магнитных наночастиц и УНТ. Исследовано влияние величины и направления магнитного поля, концентрации УНТ и магнитных наночастиц в полимерной матрице на частотные характеристики фотонного кристалла. Установлено также, что нитевидные структуры проявляют анизотропию электрофизических свойств.

В четвёртом разделе представлена разработанная модель для расчёта коэффициента отражения СВЧ излучения фотонного кристалла, содержащего композитный материал с ориентированными проводящими нитями. Композит с ориентированными нитями заменялся многослойной моделью, каждый слой которой рассчитывался с использованием теории возмущений. Модель применена для расчёта эффективной диэлектрической проницаемости композитов. Показано, что результаты расчётов с использованием разработанной модели близки к результатам, полученным в программе электродинамического моделирования Ansys HFSS. Исследована применимость разработанной модели при различных концентрациях и параметрах включений. Продемонстрирована возможность использования модели для расчёта коэффициента отражения для композитов с неоднородным заполнением. Также были исследованы критерии применимости использования более простой модели, в которой композит с проводящими нитями заменяется пластинчатой структурой.

В заклучении сформулированы основные результаты и выводы диссертационного исследования.

Все полученные автором результаты и положения, выносимые на защиту, обладают научной новизной. Из новых результатов диссертационной работы особый интерес представляют следующие.

1. Установлено, что глубина амплитудной модуляции линейно поляризованного оптического излучения, проходящего через образец в виде суспензии МЖ/УНТ, возрастает с увеличением длины волны излучения при воздействии магнитного поля с изменяющимся направлением.

2. Продемонстрировано, что при размещении композитных материалов ЭС/МЖ или ЭС/МЖ/УНТ в центральном слое фотонного кристалла в частотной зависимости коэффициента отражения СВЧ излучения появляется дефектная мода, формой которой можно управлять, изменяя величину и направление магнитного поля, воздействующего на композит.

3. Обнаружена анизотропия диэлектрической проницаемости и электропроводности в нитевидных структурах из магнитных наночастиц и УНТ, образующихся при приложении магнитного поля процессе полимеризации ЭС. Показано, что диэлектрическая проницаемость и электропроводность в таких

структурах отличаются более чем в десять раз при измерениях в продольном и поперечном направлении.

4. Разработана модель, позволяющая определить частотную зависимость коэффициента отражения от фотонного кристалла, содержащего композитный материал с тонкими нитевидными включениями с различными электрофизическими параметрами. Предложенная модель позволяет также проводить расчёты диэлектрической проницаемости и электропроводности композитов с нитевидными включениями.

Практическая значимость диссертационной работы обусловлена тем, что полученные результаты могут быть использованы при создании покрытий, поглощающих электромагнитное излучение, СВЧ фильтров, а также при разработке устройств микро- и нанoeлектроники. Установленная зависимость глубины модуляции поляризованного оптического излучения композитами МЖ/УНТ от длины волны излучения может найти применение для управления электродинамическими параметрами таких композитных материалов.

Достоверность экспериментальных результатов, представленных в диссертации, основывается на использовании современной измерительной аппаратуры, общепринятых методов обработки данных и корректных методик исследования. Достоверность теоретических результатов обеспечивается применением классических методов численного моделирования. Обоснованность полученных результатов подтверждается воспроизводимостью экспериментальных данных, согласием измеренных частотных зависимостей коэффициента отражения СВЧ излучения с теоретическими расчётами и их соответствием с полученными ранее результатами других авторов.

К диссертационной работе Иголина С.В. имеются замечания.

1. В работе описание магнитной проницаемости МЖ произведено с использованием теории динамического намагничивания однодоменной частицы, которая применима для изотропных невзаимодействующих магнитных наночастиц. Такое приближение справедливо лишь при низких концентрациях наночастиц, и его применимость должна быть обоснована. При больших концентрациях магнитостатическое взаимодействие между наночастицами может приводить как к сдвигу частоты ферромагнитного резонанса, так и к значительному уширению его линии, что существенно повлияет на частотную зависимость коэффициента отражения от фотонного кристалла. Кроме того, возникновение агломератов магнитных наночастиц при приложении поля может существенно влиять на частотную зависимость магнитной проницаемости МЖ, однако данный вопрос в работе не обсуждается.

2. Для определения эффективной диэлектрической проницаемости композита ЭС/МЖ в работе используется формула Нильсена. При этом корректное обоснование выбора этой формулы смещения не приводится, и не совсем понятно, в чём заключается её преимущество по сравнению с другими известными моделями смещения (например, часто используемой моделью Оделевского). Формула Нильсена содержит два параметра: параметр максимальной объёмной доли упаковки PF и коэффициент формы A , использованные значения которых не приведены.

3. В работе показано, что увеличение индукции магнитного поля до 300 мТл приводит к подавлению дефектной моды, а дальнейшее увеличение поля – к её восстановлению. Известно, что процессы агломерации наночастиц в магнитном поле часто проявляют гистерезис: при уменьшении магнитного поля структуры не разрушаются, а сохраняют частичную ориентацию. Это означает, что при циклическом изменении магнитного поля характеристика подавления дефектной моды может отличаться при возрастании и убывании поля. Изучалось ли поведение дефектной моды при циклическом изменении магнитного поля (петля гистерезиса по коэффициенту отражения)? Наблюдались ли необратимые изменения после снятия поля, связанные с остаточной ориентацией нитевидных структур?

4. В работе все эксперименты проводились при комнатной температуре. Однако для практических применений в СВЧ устройствах, работающих в широком температурном диапазоне, требуется знание температурных зависимостей. Проводились ли исследования влияния температуры на электрофизические параметры композитных материалов с нитевидными структурами?

Сделанные замечания не носят принципиального характера, не затрагивают основного содержания работы и не изменяют общей положительной оценки диссертационной работы Иголина С.В.

По материалам диссертационной работы опубликовано 4 статьи в научных журналах, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России. Полученные автором результаты докладывались и обсуждались на международных и всероссийских научных конференциях, и должная апробация результатов диссертации не вызывает сомнений.

Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа Иголина С.В. является законченной научно-квалификационной работой, посвящена актуальной теме, выполнена на высоком экспериментальном и теоретическом уровне, содержит ряд новых, важных в

научном и практическом плане результатов, достоверность которых не вызывает сомнений. По содержанию диссертационной работы можно заключить, что она полностью соответствует направлениям исследований, определённым пунктами 1, 2, 4, 5 в паспорте научной специальности 2.2.2. – Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств и пунктами 2, 3 в паспорте научной специальности 1.3.4. – Радиофизика.

Диссертационная работа «Управление электрофизическими и электродинамическими параметрами композитных материалов с магнитными наночастицами и углеродными наноструктурами» соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утверждённого Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Игонин Семен Владимирович, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальностям 2.2.2. – Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств и 1.3.4. – Радиофизика.

Официальный оппонент:

ведущий научный сотрудник
лаборатории электрофизики новых функциональных материалов
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института теоретической и прикладной электродинамики
Российской академии наук (ИТПЭ РАН)
д.ф.-м.н. Бузников Никита Александрович



09.09.2026

Адрес: 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 6.

Телефон: +7 495 485-99-45

Адрес электронной почты: buznikov@itae.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом

защищена диссертация: 01.04.11 – Физика магнитных явлений

Подпись Бузникова Н.А. заверяю
Заместитель директора ИТПЭ РАН
по научной работе по информационно-
вычислительным технологиям
д.ф.-м.н., доцент



Кисель Владимир Николаевич