

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Игони́на Семена Владимировича «Управление электрофизическими и электродинамическими параметрами композитных материалов с магнитными наночастицами и углеродными наноструктурами», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 2.2.2. – Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств и 1.3.4. – Радиофизика

Актуальность темы работы.

Разработка и исследование многокомпонентных сред с нановключениями является важным направлением радиофизики, микро- и наноэлектроники и имеет большое фундаментальное и прикладное значение. Использование углеродных наноструктур (в первую очередь – многостенных углеродных нанотрубок) в качестве функциональных наполнителей полимерных, жидких и твердых матриц открывает широчайшие возможности для направленного изменения диэлектрических, проводящих и экранирующих свойств композитов. В этом контексте проблема управления анизотропией свойств за счет ориентирования нанотрубок и создания нитевидных проводящих структур является исключительно актуальной в областях радиофизики, микро- и наноэлектроники.

Особый интерес представляет предложенный автором подход, основанный на применении магнитных жидкостей для ориентирования углеродных нанотрубок в полимерной матрице. Это принципиально новое направление, которое смыкает физику магнитных коллоидов, нанотехнологии и радиофизику СВЧ-диапазона, и именно в эту междисциплинарную область работа Игони́на С.В. вносит весомый вклад.

Макроскопические свойства многокомпонентных материалов определяются не только соотношением объемных долей компонентов, но и

формой включений и образующихся в композите структур. Поскольку такого рода материалы находят широкое применение в СВЧ-технике, актуальным является исследование электрофизических параметров композитов именно СВЧ-методами измерений. Определению электрофизических параметров многокомпонентных сред, содержащих углеродные наноструктуры, посвящено множество работ. Однако в них приводятся результаты экспериментальных измерений эффективных параметров и мало уделяется внимания определению параметров образующихся структур. Знание электрофизических параметров таких структур важно для прогнозирования параметров композитов.

Также в работе исследуется зависимость глубины амплитудной модуляции оптического линейно поляризованного излучения от длины волны лазерного излучения при изменении направления вектора индукции магнитного поля, воздействующего на магнитную жидкость. Результаты экспериментальных исследований могут найти применение в области оптоэлектроники.

Объём и структура диссертационной работы.

Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения и списка литературы. Работа изложена на 146 страницах, содержит 45 рисунков, 7 таблиц и список литературы из 172 наименований. По теме диссертационного исследования опубликовано 14 печатных работ. Из них 4 статьи представлены в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России и индексируемых в международных базах данных Scopus и Web of Science, 10 работ – в сборниках материалов всероссийских и международных научных конференций.

Основные научные результаты.

В первом разделе представлен обзор современного состояния исследований композитных материалов, содержащих углеродные наноструктуры и магнитные наночастицы. Особое внимание уделено изучению процессов структурообразования в многокомпонентных средах –

это необходимо для управления электрофизическими и электродинамическими параметрами композитов. Рассмотрены различные методы измерения параметров, обоснован выбор СВЧ-волноводных методов. Проведено сравнение теоретических моделей, позволяющих рассчитывать параметры углеродных наноструктур в составе многокомпонентных сред, с указанием достоинств и ограничений каждой из них. Отдельно исследованы оптические свойства магнитных жидкостей, в частности, их зависимость от длины волны оптического излучения.

Во втором разделе экспериментально продемонстрирована возможность управления частотными характеристиками электромагнитного излучения СВЧ-диапазона при взаимодействии с композитами, содержащими магнитные наночастицы и углеродные наноструктуры, посредством изменяющегося магнитного поля. Также исследована возможность регулирования глубины модуляции линейно поляризованного оптического излучения, проходящего через магнитную жидкость с углеродными нанотрубками, за счёт изменения длины волны лазерного излучения.

Третий раздел посвящён разработке и исследованию электрофизических и электродинамических свойств композитов, эти материалы перспективны в качестве поглотителей СВЧ-излучения. На основании экспериментальных данных путём решения обратной задачи методом наименьших квадратов определены эффективные диэлектрическая проницаемость и электропроводность композита с вытянутыми проводящими ориентированными нитевидными структурами, состоящими из углеродных нанотрубок. Расчёты в программах электродинамического 3D-моделирования позволили выявить анизотропию свойств нитевидных структур. Проведено сравнение степени анизотропии полученных электрофизических параметров с параметрами аналогичных структур, в которых углеродные нанотрубки заменены частицами мелкодисперсного графита.

Четвёртый раздел посвящён разработке физической модели для описания экспериментальных данных, полученных в третьем разделе. В рамках модели

композитный материал с проводящими ориентированными нитями предлагается представлять в виде многослойной структуры, слои которой включают тонкие пластины с эффективными толщинами. При расчёте электродинамических параметров применяют аппарат теории возмущений и метод матриц передачи. Критерии применимости модели исследованы достаточно подробно. Преимущество разработанной модели состоит в том, что она позволяет определять электродинамические и электрофизические параметры композитных материалов с неоднородным заполнением ориентированными нитями. В отличие от программ электродинамического 3D-моделирования представленная модель даёт возможность рассчитывать среды с множеством тонких нитей за существенно меньшее время.

В Заключение сформулированы основные результаты и выводы, полученные в ходе выполнения диссертационной работы.

Научная новизна, обоснованность и практическая значимость полученных в диссертации результатов не вызывают сомнений. В диссертации получен ряд новых результатов, которые хотелось бы отметить особо:

1. Впервые показано, что глубина амплитудной модуляции линейно поляризованного оптического излучения при прохождении через суспензию углеродных нанотрубок в магнитной жидкости возрастает с увеличением длины волны от 450 до 650 нм. Этот результат имеет прямое практическое значение для создания оптических модуляторов и управляемых фильтров.

2. Разработан и экспериментально реализован метод управления дефектной модой СВЧ-фотонного кристалла за счет изменения индукции магнитного поля, воздействующего на центральный слой в виде композита эпоксидная смола/магнитная жидкость. Это открывает возможности для создания управляемых СВЧ-фильтров, переключателей и аттенюаторов нового поколения. Особо важным, на мой взгляд, является вывод о существовании оптимальной объемной доли магнитной жидкости ($\sim 0.1\text{--}0.2$), при которой подавление дефектной моды достигает максимума. Автор связывает немонотонность этой зависимости с реологическими эффектами и

неоднородным распределением магнитной жидкости в композите, что подтверждается введением загустителя «Аэросил».

3. Впервые получены количественные данные об анизотропии электрофизических параметров нитевидных структур, состоящих из углеродных нанотрубок и магнитных наночастиц. Установлено, что диэлектрическая проницаемость вдоль нитей может превышать поперечную более чем в 10 раз (в то время как для графитовых композитов это отношение не превышает двух). Это принципиально важный результат, который показывает преимущество углеродных нанотрубок перед другими проводящими наполнителями для создания анизотропных материалов. Автором установлен пороговый эффект по концентрации суспензии МЖ/УНТ (~12 мас.%) и по отношению массы УНТ к массе магнитных наночастиц (~0.35), при превышении которых анизотропия снижается.

4. Разработана физическая модель «возмущенных слоев» (MPL), позволяющая с высокой точностью рассчитывать эффективные электродинамические и электрофизические параметры волокнистых композитов с неоднородным заполнением (погрешность менее 2% по частоте и величине минимума коэффициента отражения). Это значительный шаг вперед по сравнению с классическими моделями эффективных сред (Бруггемана, Максвелла-Гарнетта), поскольку модель MPL учитывает конечные размеры нитей и их распределение по сечению волновода.

Результаты проведенных исследований имеют несомненную практическую ценность как с точки зрения разработки модели, описывающей взаимодействие электромагнитного излучения СВЧ-диапазона с многокомпонентными волокнистыми средами, так и создания радиопоглощающих покрытий, радиоэлектронных и оптических устройств, характеристиками которых можно управлять посредством приложения изменяющегося магнитного поля.

Обоснованность и достоверность полученных диссертантом результатов, положений и сделанных им выводов обеспечивается

обоснованностью выбранного метода теоретического описания взаимодействия электромагнитного излучения СВЧ-диапазона с магнитными наночастицами магнитной жидкости и углеродными наноструктурами, использованием современной измерительной аппаратуры, обработкой экспериментальных данных с использованием стандартных апробированных методов, качественным и количественным соответствием выводов теории основным результатам, полученным экспериментально.

Соответствие содержания научной специальности.

По содержанию диссертационной работы можно сделать вывод о соответствии следующим направлениям исследований, определенным в паспорте научной специальности 2.2.2. – Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств:

- п. 1 «Разработка и исследование физических основ создания новых и совершенствования существующих приборов, интегральных схем, изделий микро- и нанoeлектроники, твердотельной электроники, дискретных радиоэлектронных компонентов, микроэлектромеханических систем (МЭМС), нанoeлектромеханических систем (НЭМС), квантовых устройств, включая оптоэлектронные приборы и преобразователи физических величин»;
- п. 2 «Исследование и разработка физических и математических моделей изделий по п. 1, в том числе для систем автоматизированного проектирования»;
- п. 4 «Исследование, моделирование и разработка технологических процессов и маршрутов изготовления, методов измерения характеристик и совершенствования изделий по п. 1»;
- п. 5 «Исследование, проектирование и моделирование изделий, исследование их функциональных и эксплуатационных характеристик по п. 1, включая вопросы качества, долговечности, надежности и стойкости к внешним воздействующим факторам, а также вопросы их эффективного применения», и паспорте научной специальности 1.3.4. – Радиофизика:

п. 2 «Изучение линейных и нелинейных процессов излучения, распространения, дифракции, рассеяния, взаимодействия и трансформации волн в естественных и искусственных средах»;

п. 3 «Разработка и исследование новых электродинамических систем и устройств формирования и передачи радиосигналов: резонаторов, волноводов, фильтров и антенных систем в радио, оптическом и ИК – диапазоне».

Замечания.

При общей высокой оценке диссертации считаю необходимым высказать несколько замечаний и вопросов, носящих дискуссионный характер:

1. *О механизме адсорбции наночастиц магнетита на поверхности углеродных нанотрубок.* Автор утверждает, что адсорбция происходит за счет вандерваальсовых сил. Насколько этот механизм является доминирующим или возможны также электростатические взаимодействия (учитывая, что поверхность нанотрубок может нести некоторый заряд, а олеиновая кислота, стабилизирующая магнетит, имеет полярную голову)? Не проводились ли исследования ζ -потенциала суспензий МЖ/УНТ?

2. *О кинетике структурообразования.* В работе указано, что полимеризация композита происходит в течение суток. Известно, что магнитные жидкости обладают вязкостью и временами релаксации, которые могут влиять на процесс формирования нитевидных структур. Как именно меняется морфология структур (длина, толщина, плотность) в зависимости от времени полимеризации в магнитном поле? Исследовалось ли это с помощью растровой электронной микроскопии на разных стадиях полимеризации?

3. *О частотной зависимости диэлектрической проницаемости.* В работе приведены значения диэлектрической проницаемости и проводимости нитевидных структур для частоты дефектной моды (~ 9.2 ГГц). Остаются ли эти параметры постоянными в исследуемом диапазоне (8–12 ГГц) или наблюдается дисперсия?

4. *О природе порогового эффекта по концентрации.* Установлено, что при превышении концентрации суспензии МЖ/УНТ более 12 мас.%

анизотропия свойств ухудшается. Автор связывает это с изменением реологических свойств. Не может ли это быть связано также с агрегацией нанотрубок в «паутины» или с образованием замкнутых проводящих контуров, которые нивелируют анизотропию? Этот вопрос важен с практической точки зрения, поскольку он определяет оптимальную рецептуру композита.

5. Следует отметить, что при общем высоком качестве оформления в работе все же имеется небольшое количество пунктуационных ошибок, которые не влияют на прочтение диссертации.

Указанные замечания носят характер пожеланий к дальнейшим исследованиям и не снижают общей высокой положительной оценки диссертационной работы.

Таким образом, работа Иголина С.В. является **законченным научным исследованием**, которое может быть квалифицировано как решение важной научной задачи, посвященной разработке многокомпонентных сред, содержащих магнитные и углеродные наночастицы, и исследованию возможности управления электрофизическими и электродинамическими параметрами такого рода композитов, осуществляемого за счет образования проводящих нитевидных структур при приложении магнитного поля с изменяющейся величиной или направлением вектора индукции, имеющей существенное значение для радиофизики, микро- и нанoeлектроники.

Автореферат адекватно и в полной мере отражает основное содержание и ключевые положения диссертационного исследования.

Заключение о соответствии диссертации требованиям, предъявляемым к работе на соискание степени кандидата наук.

Считаю, что диссертационная работа Иголина С.В. «Управление электрофизическими и электродинамическими параметрами композитных материалов с магнитными наночастицами и углеродными наноструктурами» полностью соответствует критериям пп. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением

Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а автор диссертации Игонин Семен Владимирович заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальностям 2.2.2. – Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств и 1.3.4. – Радиофизика.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, профессор,
профессор кафедры судебной экспертизы
и физического материаловедения
физико-технического института федерального
государственного автономного образовательного
учреждения высшего образования
«Волгоградский государственный университет»

09.09.2026



Запороцкова Ирина Владимировна

Контактные данные:

400062, Волгоградская область, г. Волгоград, просп. Университетский, д.100
тел. +7 (8442) 460-263, эл. почта zaporotskova@volsu.ru

Личную подпись Запороцковой Ирины Владимировны заверяю

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена
диссертация на соискание степени доктора физико-математических наук –
05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты,
микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах.



_____ заверяю

