

На правах рукописи



Игонин Семен Владимирович

**УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИМИ И
ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ КОМПОЗИТНЫХ
МАТЕРИАЛОВ С МАГНИТНЫМИ НАНОЧАСТИЦАМИ И
УГЛЕРОДНЫМИ НАНОСТРУКТУРАМИ**

2.2.2. – Электронная компонентная база
микро- и наноэлектроники, квантовых устройств,
1.3.4. – Радиофизика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Саратов – 2026

Работа выполнена на кафедре физики твердого тела федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» (ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»)

Научные руководители:

Постельга Александр Эдуардович,

кандидат физико-математических наук

Скрипаль Александр Владимирович,

доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Запороцкова Ирина Владимировна, доктор физико-математических наук, профессор, Почетный работник Высшего образования РФ, Почетный наставник РФ, профессор кафедры судебной экспертизы и физического материаловедения физико-технического института федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Волгоградский государственный университет», г. Волгоград.

Бузников Никита Александрович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории электрофизики новых функциональных материалов федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт теоретической и прикладной электродинамики Российской академии наук (ИТПЭ РАН), г. Москва.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный университет», г. Воронеж.

Защита диссертации состоится 16 октября 2026 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета 24.2.392.01 на базе ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского» по адресу: 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83, Х корпус СГУ, 511 ауд.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке имени В.А. Артисевич ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского» (г. Саратов, ул. Университетская, 42) и на сайте: <https://www.sgu.ru/research/dissertation-council/24-2-392-01/upravlenie-elektrofizicheskimi-i-elektrodinamicheskimi>

Автореферат разослан « » июля 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.2.392.01



Слепченков Михаил Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

Углеродные наноструктуры широко используются в различных областях, особенно в электронной промышленности, в том числе микро- и нанoeлектронике. Перспективным является использование композитных материалов, содержащих углеродные наноструктуры. Изменяя объемное соотношение и конфигурацию компонентов, можно управлять свойствами композита. В связи с чем композитные материалы нашли огромное применение в ряде областей науки и техники среди которых строительство, автомобильная, энергетическая и космическая промышленность, медицина, микро и нанoeлектроника [1-4].

Интересной является возможность управления параметрами композита в процессе их производства [5, 6] или использования [7]. Управление может осуществляться в широких пределах путем ориентирования углеродных нанотрубок (УНТ) в объеме матрицы, поскольку УНТ обладают анизотропией свойств вследствие высокого аспектного отношения. Обычно для выравнивания УНТ в полимерной матрице используют сильные электрические поля [8], что требует значительных энергетических затрат. Метод приложения механического сдвигового напряжения [9] не подходит для управления параметрами композита в процессе его использования.

В настоящей работе проблему ориентирования углеродных наноструктур с целью управления параметрами композитных материалов предлагается решать с использованием магнитных жидкостей (МЖ), представляющих собой суспензию из мелких (3-15 нм) твердых магнитных однодоменных наночастиц, покрытых молекулярным слоем диспергирующего вещества и взвешенных в жидкости носителе. При приложении магнитного поля в объеме магнитной жидкости образуются агломераты магнитных наночастиц [10], длина которых с ростом величины индукции магнитного поля увеличивается от долей до сотен микрон [11], что позволяет рассматривать магнитную жидкость как анизотропный композит с управляемыми параметрами. Это может быть использовано при создании оптических устройств с элементами, прозрачность которых изменяется от величины магнитного поля. Например, для амплитудной модуляции оптических сигналов.

В [12] показано, что интенсивность прошедшего через магнитную жидкость электромагнитного излучения при приложении магнитного поля вдоль направления распространения оптического луча уменьшается с ростом длины волны от 600 нм до 1200 нм. В [13] исследуются спектры дихроизма в слабых магнитных полях через толстый слой (5 мм) МЖ с объемной долей твердой фазы 0.05%. Отмечено, что при увеличении напряженности магнитного поля свыше 10 кА/м форма спектров дихроизма существенно меняется – параметр дихроизма существенно возрастает во всей видимой и ближней ИК области. В [14] исследовалось пропускание через МЖ (средний диаметр частиц 68 нм, объемная доля твердой фазы 0.7%) в магнитном поле с различными значениями индукции линейно поляризованного оптического излучения с длинами волн от 600 до 900 нм. Максимальный линейный дихроизм наблюдался при длине волны 600 нм и возрастал с увеличением индукции магнитного поля. В представленных работах исследуются разбавленные магнитные жидкости, хотя в [15] отмечается, что при объемных долях твердой фазы более 1.5 %, интенсивность пропускаемого света уменьшается с увеличением индукции магнитного поля более 50 Гс. В представленных работах не исследовалось изменение оптических свойств при добавлении УНТ. В то время как, добавление в магнитную жидкость УНТ позволяет увеличить степень анизотропии [16]. Модулирование мощности линейно поляризованного оптического излучения с длиной волны 650 нм, проходящего через композиты на основе МЖ, содержащих УНТ, путем изменения величины и направления индукции магнитного поля, рассматривалось в [17], но не исследовалась зависимость глубины модуляции от длины волны.

Согласно результатам квантово-химического моделирования, в [18] установлено, что полимерный материал поливинилпирролидон взаимодействует с нанотрубками за счет

сочетания ван-дер-ваальсовых и кулоновских сил. Моделирование показало изменение электронно-энергетического строения комплексов, которое обеспечивает появление у композиционного материала полупроводящих свойств, что демонстрирует перспективность использования УНТ при создании функциональных материалов.

Значительное число работ посвящено исследованию в СВЧ диапазоне экранирующих свойств полимерных композитов, содержащих углеродные наноструктуры. Существуют работы, в которых исследовались характеристики коэффициента отражения микроволн от композитов на основе эпоксидной смолы, содержащей магнитно-модифицированные УНТ с различным выравниванием по отношению к электрическому полю падающей СВЧ волны [19], при этом выравнивание УНТ осуществлялось за счет размещения композита в процессе полимеризации в магнитном поле. В [20] измерялась эффективная электропроводность композитов, максимальное отношение электропроводности при параллельной и перпендикулярной ориентации структур из УНТ составила 4 при массовой доле магнитно-модифицированных УНТ порядка 1%.

Помещение МЖ в жидкую матрицу приводит к образованию микрокапельных агрегатов [21], взвешенных в жидкости носителе. При воздействии магнитного поля в магнитной жидкости наблюдается структурирование капель в виде цепочечных агрегатов [22]. Использование в качестве матрицы полимерных материалов, позволяет создавать твердые и эластичные композиты с ориентированными включениями в форме вытянутых эллипсоидов или цепочек из микрокапель [23]. Полимерные композиты, содержащие магнитную жидкость, изучаются достаточно долгое время, в основном с целью создания поглощающих покрытий [24]. Однако применению магнитных жидкостей для выравнивания углеродных наноструктур в полимерной матрице с целью управления электрофизическими параметрами композитов уделено мало внимания.

В приведенных работах не рассматривалось управление параметрами композита в результате изменения величины индукции магнитного поля, а также отношения массы УНТ к массе магнитных наночастиц. Также не исследовалась анизотропия свойств самих включений из ориентированных углеродных наноструктур, образующихся в полимерной матрице, для расчета которой требуется измерение эффективных параметров композита с высокой точностью. Повышение точности достигается созданием высокочастотной резонансной системы, к которой можно отнести периодические структуры с периодом, сравнимым с длиной волны – СВЧ фотонные кристаллы [25]. Нарушение периодичности приводит к появлению резкого минимума на частотной зависимости коэффициента отражения СВЧ излучения – дефектной моде, положение которой определяется параметрами нарушенного слоя. Ранее фотонные кристаллы применялись для измерения параметров металлических нанослоев, графеновых структур и металлодиэлектрических метаповерхностей [26]. Исследования же анизотропии свойств нитевидных структур, состоящих из УНТ и магнитных наночастиц, не производились.

В случае, если нитевидные включения распределены равномерно по объему образца, для расчета их параметров могут быть применены формулы эффективных сред, таких как Бругеммана [27] или Максвелла-Гарнетта [28] в приближении вытянутых эллипсоидов. Однако в ходе проделанной нами экспериментальной работы были созданы композиты, содержащие ориентированные проводящие нити, распределенные по объему образца неоднородно. Расчет таких структур в программах электродинамического моделирования занимает значительное время при толщинах нитей менее 15 мкм. В связи с чем потребовалась необходимость разработки физической модели [29]. Следует отметить работу [30], в которой учет нитевидных структур из магнитных наночастиц с использованием аппарата теории возмущений позволил добиться увеличения точности определения параметров магнитной жидкости.

Также до настоящего времени полимерные композиты, содержащие магнитные жидкости, не использовались для управления характеристиками СВЧ-фотонных кристаллов, хотя известны работы, в которых управление осуществлялось за счет

электрического [31] поля.

В связи с вышеизложенным, является актуальной проблема исследования особенностей взаимодействия электромагнитного излучения оптического и СВЧ-диапазонов с композитами, содержащими вытянутые структуры, параметрами которых можно управлять, и разработка численных методов, позволяющих прогнозировать электрофизические параметры волокнистых композитов, в т.ч. с неоднородным заполнением.

Цель диссертационной работы:

Разработка эффективных методов управления электрофизическими и электродинамическими характеристиками композитных материалов с магнитными наночастицами и углеродными наноструктурами, основанных на результатах исследований особенностей взаимодействия с исследуемыми материалами электромагнитного излучения оптического и СВЧ-диапазонов с использованием методов численного моделирования и экспериментальных данных.

Для достижения поставленной цели были решены **следующие задачи:**

1. Анализ современного состояния исследований композитов, содержащих магнитные жидкости и углеродные наноструктуры, процессов структурообразования в магнитном поле и методов определения параметров таких композитов.

2. Экспериментальное исследование процессов структурной организации в композитах эпоксидная смола/магнитная жидкость (ЭС/МЖ) и эпоксидная смола/магнитная жидкость/углеродные нанотрубки (ЭС/МЖ/УНТ).

3. Разработка метода управления глубиной модуляции линейно поляризованного оптического излучения, проходящего через композит – магнитная жидкость/углеродные нанотрубки (МЖ/УНТ) – во внешнем магнитном поле за счет изменения длины волны лазерного излучения.

4. Разработка метода управления электродинамическими характеристиками, определяющими коэффициент отражения СВЧ-излучения от периодической структуры, содержащей в качестве нарушенного слоя композит на основе эпоксидной смолы с различными объемными долями магнитной жидкости, посредством изменения величины индукции магнитного поля.

5. Экспериментальное исследование влияния концентрации УНТ, объемной доли МЖ и индукции магнитного поля на электрофизические характеристики композита методом характеристики электродинамических параметров СВЧ фотонных кристаллов с нарушением периодичности.

6. Разработка физической модели, позволяющей рассчитывать объемную долю и комплексную диэлектрическую проницаемость нитевидных структур, для создания волокнистых композитов с заданными электрофизическими параметрами.

Новизна исследований, проведенных в ходе выполнения диссертационной работы:

1. Экспериментально установлено, что глубина амплитудной модуляции линейно поляризованного оптического излучения возрастает с увеличением длины волны лазерного излучения от 450 нм до 650 нм, проходящего через композит МЖ/УНТ (проводящие многостенные УНТ серии «Таунит-М» со средним диаметром 10-30 нм и длиной более 2 мкм), при воздействии на композит магнитного поля с изменяющимся направлением вектора магнитной индукции.

2. Экспериментально показано, что при размещении композита ЭС/МЖ или ЭС/МЖ/УНТ в качестве нарушения в центральном слое фотонного кристалла, состоящего из чередующихся слоев поликора и фторопласта (всего 11 слоев), на частотной зависимости коэффициента отражения СВЧ-излучения от такой структуры присутствует резкий минимум – дефектная мода – формой которой можно управлять, изменяя объемную долю компонентов, входящих в композит или величину и направление индукции магнитного поля, в частности, осуществлять подавление дефектной моды.

3. Установлено, что нитевидные структуры из магнитных наночастиц и УНТ, образующиеся при приложении магнитного поля в эпоксидной смоле в процессе её полимеризации, обладают анизотропией электрофизических свойств, диэлектрическая проницаемость и электропроводность отличаются более чем в 10 раз при измерениях в ортогональных направлениях, в то время как для композитов с графитом данный показатель не превосходит двух. Диэлектрическая проницаемость в продольном/поперечном направлении для нитевидных структур из УНТ и графита составила 55.2/4.5 и 23.5/12.9, соответственно, а электропроводность 6.04/0.57 и 2.18/1.13 ($\text{Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$).

4. Установлено, что при нахождении в области действия локализованного магнитного поля с индукцией более 600 мТл, магнитная жидкость стягивается в область концентрации магнитных силовых линий, что позволяет управлять степенью неоднородности заполнения композита. При этом дефектная мода подавляется сильнее (дополнительно на 2 дБ при размещении композита, полимеризация которого происходила при индукции магнитного поля 1200 мТл).

5. Разработана физическая модель, позволяющая определять диэлектрическую проницаемость и электропроводность композитов, содержащих тонкие нитевидные включения с различными электрофизическими параметрами и толщинами менее 200 мкм, ориентированными параллельно электрической компоненте СВЧ-волны в прямоугольном волноводе, в том числе, имеющих неоднородное заполнение.

Достоверность полученных в рамках диссертации результатов обеспечивается применением классических методов численного моделирования: матриц передачи, для описания взаимодействия электромагнитного излучения СВЧ-диапазона с периодическими структурами, и теории возмущений, для описания взаимодействия с включениями малых размеров. Сходимостью полученных экспериментальных частотных зависимостей коэффициента отражения СВЧ-излучения от периодических структур, содержащих в качестве нарушения исследуемый волокнистый композит, с теоретическими расчетами по разработанной физической модели и с использованием программных пакетов электродинамического 3D моделирования, протестированных на большом классе радиофизических задач. Достоверность экспериментальных результатов обеспечена использованием стандартной измерительной аппаратуры, обработкой экспериментальных данных согласно стандартным методам, корректностью использованных методик исследования. Также достоверность подтверждается согласованностью описанных выводов с полученными ранее результатами других авторов.

Практическая значимость полученных результатов заключается в следующем:

1. Установлен характер зависимости глубины модуляции поляризованного оптического излучения, проходящего через композит МЖ/УНТ, от длины волны оптического излучения.

2. Разработан экспериментальный метод с использованием СВЧ фотонного кристалла, позволяющий в результате решения обратной задачи контролировать эффективные параметры композитов с нитевидными включениями, а также степень анизотропии электрофизических параметров самих включений.

3. Методом характеристики амплитудно-частотной зависимости дефектной моды СВЧ фотонного кристалла определены оптимальные значения магнитного поля, объемной доли МЖ и отношения массы УНТ к массе магнитных наночастиц, при которых наблюдается максимальная разница электрофизических параметров композитов ЭС/МЖ/УНТ, полимеризация которых происходила в присутствии магнитного поля и без магнитного поля.

4. Разработанная физическая модель позволяет рассчитывать спектр коэффициента отражения от участка волновода прямоугольного сечения, содержащего множество нитей микронных размеров, ориентированных параллельно электрической компоненте СВЧ-волны, а также рассчитывать эффективную диэлектрическую проницаемость и электропроводность композитов с подобными включениями.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Глубина амплитудной модуляции линейно поляризованного оптического излучения, проходящего через образец в виде суспензии проводящих углеродных нанотрубок в магнитной жидкости с объемной долей твердой фазы 0.1, средним диаметром магнетитовых наночастиц 10 нм, обусловленной изменением направления вектора магнитной индукции воздействующего на образец постоянного магнитного поля, возрастает с увеличением длины волны в диапазоне от 450 нм до 650 нм.
2. Степень подавления дефектной моды СВЧ фотонного кристалла, содержащего в качестве нарушенного слоя композит на основе твердой полимерной матрицы с включениями в виде магнитной жидкости, определяется величиной индукции постоянного магнитного поля, воздействующего на композит.
3. При введении в полимерную матрицу с нитевидными структурами на основе агломератов из магнитных наночастиц, образующихся в постоянном магнитном поле, проводящих многостенных углеродных нанотрубок возникает анизотропия диэлектрической проницаемости и электропроводности нитевидных структур из магнитных наночастиц и углеродных нанотрубок, приводящая к более чем 10-ти кратному отношению этих величин, измеренных вдоль и поперёк нитевидных структур, при отношении массы углеродных нанотрубок к массе магнитных наночастиц 0.14.
4. Физическая модель, представляющая образец композита, содержащий ориентированные проводящие нити, в виде многослойной структуры, состоящей из пластин с эффективными толщинами, определяемыми долей объема нити, попадающей в слой, позволяет корректно рассчитывать частотную зависимость коэффициента отражения сверхвысокочастотного электромагнитного излучения от периодической структуры при размещении в ней композита в качестве центрального слоя, с погрешностью менее 2% при объемных долях нитей до 5% с относительной диэлектрической проницаемостью в диапазоне от 2 до 50 единиц и электропроводностью в диапазоне от 0.1 до 50 Ом⁻¹·м⁻¹, в том числе с неоднородным заполнением, и адекватно решать обратную задачу по нахождению диэлектрической проницаемости и электропроводности композитных материалов с использованием частотной зависимости коэффициента отражения с погрешностью не более 5%.

Апробация работы. Работа выполнена на кафедре физики твердого тела Саратовского национального исследовательского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского в период 2017-2026 годов. Ключевые результаты и основные положения диссертационного исследования были представлены на:

1. Всероссийских научных школах–семинарах «Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро– и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами». Саратов, 18–19 мая 2017 г., 16–17 мая 2018 г., 16–17 мая 2019 г., 19-20 мая 2020 г., 11-14 мая 2021 г., 24-25 мая 2023 г., 23-24 мая 2024 г., 22-23 мая 2025 г.
2. 18 Международной Плесской конференции по нанодисперсным магнитным жидкостям. Плес, 4–7 сентября 2018 г.
3. VIII Международной Ставропольской конференции по магнитным коллоидам. Ставрополь, 10-14 сентября 2023 г.
4. IV Международной научно-технической конференции «Нанотехнологии и наноматериалы: современное состояние и перспективы развития». Волгоград, 25-26 апреля 2024 г.
5. На семинарах кафедры физики твердого тела.

Исследования выполнялись в рамках государственного задания Минобрнауки России в сфере научной деятельности (базовая часть) 8.7628.2017/БЧ, код проекта 7628 по теме «Разработка новых типов функциональных устройств СВЧ, КВЧ и терагерцового диапазонов и методов диагностики с использованием ближнеполевой СВЧ-микроскопии на основе фотонных кристаллов», проектной части государственного задания в сфере научной

деятельности Министерства образования и науки Российской Федерации по теме «Исследование эффектов резонансного взаимодействия электромагнитного излучения сверхвысокочастотного и терагерцового диапазонов с неоднородными микро- и наноструктурами и композитами» №16.1575.2014/К, шифр: «Наноскоп-2»;

Результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы, использованы в учебном процессе для подготовки студентов института физики СГУ, обучающихся по направлениям бакалавриата и магистратуры «Физика», «Электроника и наноэлектроника».

По результатам исследований, выполненных при работе над диссертацией, опубликовано 14 работ, в том числе 4 статьи в журналах, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России, 10 работ в сборниках статей по докладам на конференциях.

Личный вклад автора выразился в проведении всего объема экспериментальных работ, практической реализации экспериментальных методов, проведении компьютерного моделирования и анализе его результатов, анализе полученных экспериментальных результатов, участии в формулировании научных положений и выводов.

Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 146 страниц машинописного текста, включая 45 рисунков и 7 таблиц. Список литературы содержит 172 наименования и изложен на 23 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследований, сформулирована цель диссертационной работы, определена новизна исследований, обсуждена практическая значимость полученных результатов, приведены основные положения, выносимые на защиту, изложено краткое содержание диссертации.

В первом разделе приведены результаты анализа современного состояния исследований композитных материалов, содержащих углеродные наноструктуры. Показано, что добавлением УНТ можно в широких пределах управлять свойствами композитных материалов. Особое внимание уделено обзору работ, в которых изучаются электрофизические параметры композитов на сверхвысоких частотах. Была исследована проблема управления параметрами композитных материалов и исследована возможность применения для этих целей магнитных жидкостей, для чего были рассмотрены процессы структурообразования в магнитных жидкостях. Также были проанализированы различные теоретические модели, позволяющие производить расчет электрофизических параметров УНТ в составе композитного материала и произведен обзор существующих экспериментальных методов измерений параметров композитных материалов.

Во втором разделе описаны результаты экспериментальных исследований, демонстрирующие зависимость оптических свойств композитов на основе магнитных жидкостей от длины волны линейно-поляризованного оптического излучения. В качестве композита использовалась магнитная жидкость (на основе керосина с магнитными наночастицами магнетита Fe_3O_4 , стабилизированными олеиновой кислотой, средний диаметр частиц составлял 10 нм, а объемная доля твердой фазы была равна 0.1), с диспергированными в ней проводящими многостенными УНТ серии «Таунит-М» диаметром 10-30 нм и длиной более 2 мкм.

Измерялась глубина амплитудной модуляции линейно поляризованного лазерного излучения, проходящего через кювету с МЖ и суспензией МЖ/УНТ. Толщина слоя с исследуемым композитом составляла 100 мкм. Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Для вычисления глубины модуляции поляризованного оптического излучения использовалась следующая формула:

$$M = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_{\max}}, \quad (1)$$

где $U_{\min}$ и $U_{\max}$ – напряжение на фотодиоде при параллельной и перпендикулярной ориентации электрического вектора линейно поляризованного оптического излучения

относительно направления вектора индукции магнитного поля.

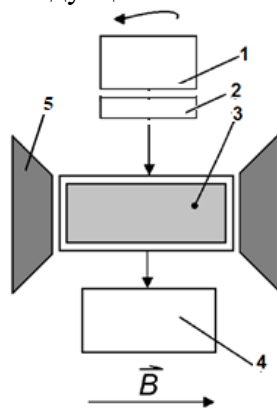


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – источник лазерного излучения, 2 – поляризатор, 3 – ячейка с исследуемой суспензией (МЖ/УНТ), 4 – фотодиод, 5 – обкладки электромагнита.

При изменении угла между электрической компонентой лазерного излучения и вектором магнитной индукции наблюдалось изменение интенсивности лазерного излучения, проходящего через ячейку с исследуемым композитом. Это обусловлено тем, что менялась ориентация электрической составляющей лазерного излучения по отношению к агломератам, формирующимся из ферромагнитных наночастиц и углеродных нанотрубок в магнитной жидкости под влиянием магнитного поля.

Электрическое поле линейно поляризованного оптического излучения наиболее эффективно взаимодействует с агломератами в том случае, когда направление электрического вектора совпадает с направлением агломератов, при этом становится максимальным коэффициент экстинкции. В обратном случае, когда агломераты и вектор электрического поля поляризованного оптического излучения ориентированы ортогонально друг другу, коэффициент экстинкции становится минимальным.

Выявлено, что увеличение длины волны лазерного излучения и величины индукции магнитного поля приводит к увеличению значения глубины амплитудной модуляции линейно поляризованного оптического излучения до 15% (рис. 2а), добавление УНТ приводит к росту (примерно в полтора раза) глубины модуляции (рис. 2б).

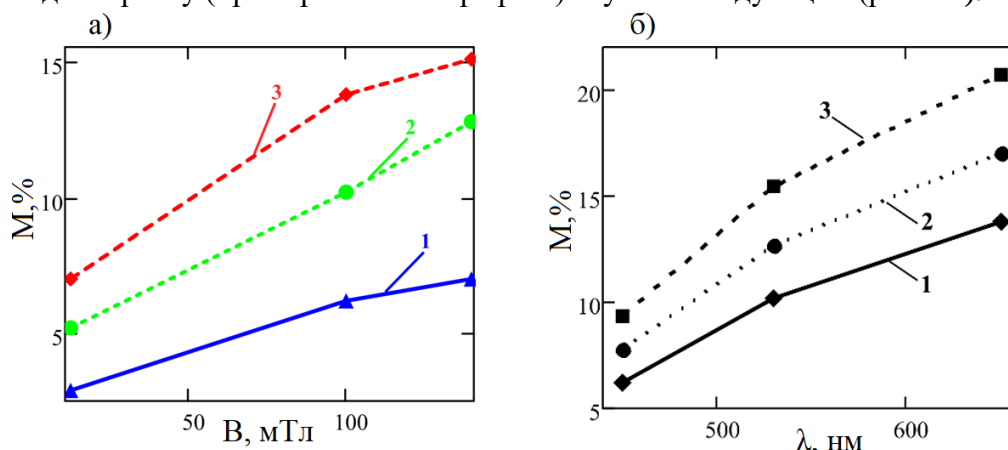


Рис. 2. Зависимость глубины амплитудной модуляции линейно поляризованного лазерного излучения при прохождении через: а) магнитную жидкость от индукции магнитного поля для лазеров с длиной волны: 1 – 450 нм, 2 – 530 нм, 3 – 650 нм; б) композит МЖ/УНТ от длины волны лазерного излучения при приложении магнитного поля с индукцией 100 мТл с различной концентрацией УНТ: 1 – без УНТ, 2 – 0.01 мас.%, 3 – 0.02 мас.%.

Увеличение индукции магнитного поля приводит к тому, что возрастает толщина и длина агломератов из магнитных наночастиц, что приводит, вне зависимости от длины волны, к росту глубины модуляции линейно поляризованного оптического излучения. При увеличении длины волны лазерного излучения глубина модуляции увеличивается, что

объясняется уменьшением поглощения в случае, когда электрическая составляющая лазерного излучения направлена перпендикулярно агломератам, вследствие уменьшения электрической толщины агломератов.

При добавлении УНТ в МЖ происходит адсорбция магнитных наночастиц на поверхности УНТ за счет сил Ван-дер-Ваальса, что приводит при приложении магнитного поля к выстраиванию УНТ вдоль нитевидных агломератов [17], состоящих из ферромагнитных наночастиц. Теперь агломераты следует рассматривать как комплексы с высокой проводимостью, состоящие из ферромагнитных наночастиц и УНТ. В итоге коэффициент экстинкции лазерного излучения увеличивается в случае, когда ориентация агломератов совпадает с направлением вектора электрического поля. Это приводит к росту глубины модуляции (рис. 2б) поляризованного оптического излучения, прошедшего через композит МЖ/УНТ при увеличении массовой доли УНТ в МЖ.

Максимальная величина модуляции через ячейку, содержащую МЖ без УНТ, достигала 15% при длине волны лазерного излучения 650 нм. Добавление многостенных УНТ в МЖ приводит к росту (примерно в полтора раза) глубины модуляции.

Далее решалась задача по оптимизации параметров композитов для средств управления характеристиками СВЧ излучения. Герметизация МЖ в волноводе связана с технологическими трудностями. В настоящей работе предлагается фиксировать магнитную жидкость в твердой матрице, а именно, эпоксидной смоле. Производилось механическое перемешивание МЖ с жидкой ЭС и отвердителем, полученная суспензия заливалась в силиконовые формы, полимеризация композита происходила в течении суток.

В процессе полимеризации в эпоксидной смоле из магнитной жидкости формируются структуры в виде капель микронных размеров. Диаметр капель составляет 10 – 50 мкм (рис. 3а). Чем больше магнитной жидкости присутствует в композите, тем больше размер капель и их количество (рис. 3б). Превышение порогового значения объемной доли магнитной жидкости порядка 0.2 приводит к появлению ячеистой структуры (рис. 3в). Возрастание концентрации магнитной жидкости до 0.3 приводит к началу процесса расслоения композита (рис. 3г).

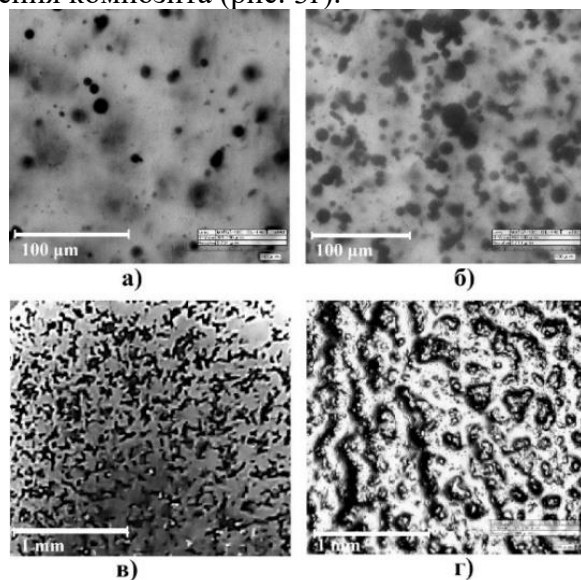


Рис. 3. Оптические фотографии образцов композита ЭС/МЖ при объемных долях МЖ v_{ff} : а) 0.004, б) 0.065, в) 0.210, г) 0.315.

Исследовались спектры коэффициента отражения СВЧ-излучения, распространяющегося в прямоугольном волноводе сечением 23x10 мм вдоль оси Z, от одномерного СВЧ-фотонного кристалла (рис. 4), представляющего собой периодическую 11-слойную структуру из чередующихся слоев поликора толщиной 1.0 мм и фторопласта толщиной 9.8 мм. В качестве нарушения периодичности в центральном слое располагался композит эпоксидная смола/магнитная жидкость (ЭС/МЖ) толщиной 4 мм, полимеризация

происходила в отсутствии магнитного поля. Вектор индукции магнитного поля направлялся перпендикулярно широкой стенке волновода (вдоль оси Y).

Спектр коэффициента отражения СВЧ излучения от периодической структуры с нарушением (рис. 4) характеризуется наличием резонансного минимума – дефектной моды, в случае измерений, произведенных без магнитного поля (рис. 5а, кривая 1). Увеличение индукции магнитного поля приводит к подавлению дефектной моды до предельного значения (рис. 5а, кривая 2), что обусловлено изменением действительной и мнимой части магнитной восприимчивости, вследствие возникновения эффекта ферромагнитного резонанса на частоте дефектной моды. Дальнейшее увеличение магнитного поля приводит к восстановлению дефектной моды.

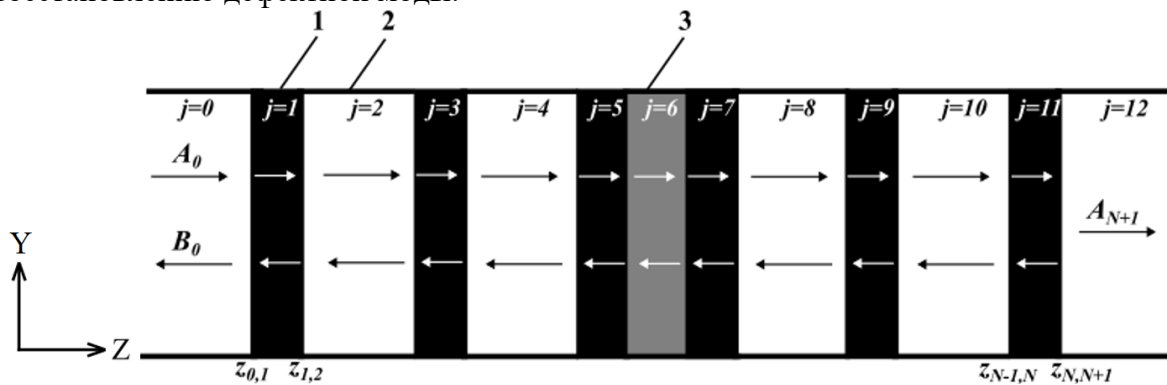


Рис. 4. Продольное сечение волновода, в котором расположена исследуемая структура, состоящая из следующих слоев: 1 – слои поликора толщиной 1.0 мм, 2 – слои фторопласта толщиной 9.8 мм, 3 – образец исследуемого композита толщиной 4 мм, j – номер слоя, $z_{j,j+1}$ – расстояние от поверхности структуры до границы между слоями с номером j и $j+1$, A_j и B_j – амплитуды падающих и отраженных электромагнитных волн в слое с номером j .

Степень подавления дефектной моды $\Delta R(B) = R(B) - R(0)$, равная разности величины минимума коэффициента отражения от СВЧ-фотонного кристалла (рис. 4) в магнитном поле и без магнитного поля, принимает максимальное значение ΔR_{max} , в зависимости от объемной доли МЖ, при величине индукции магнитного поля B_{Rmax} . На рис. 6 (кривая 1) показано, как параметр ΔR_{max} зависит от объемной доли МЖ в композите.

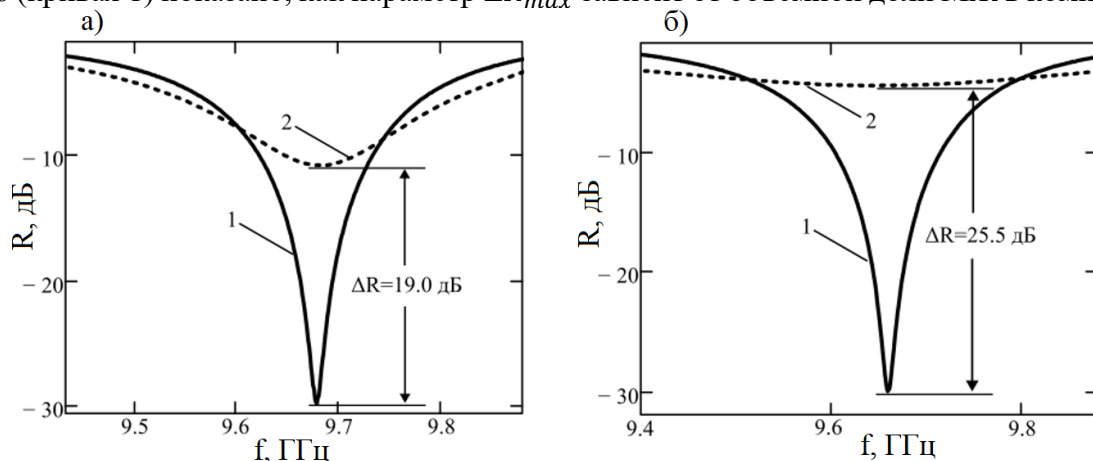


Рис. 5. Частотные зависимости коэффициента отражения электромагнитной волны СВЧ диапазона от фотонной структуры (рис. 4) в отсутствии магнитного поля (кривая 1), при приложении магнитного поля индукцией 300 мТл (кривая 2), в качестве нарушения используется композит с объемной долей МЖ $v_{ff} = 0.350$: а) образец без «Аэросила», б) образец с объемной долей «Аэросила» $v_{aerosil} = 0.010$.

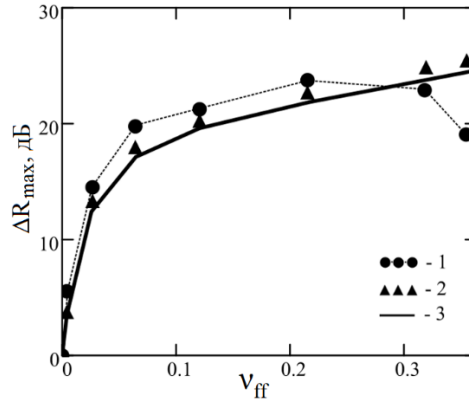


Рис. 6. Зависимость максимальной степени подавления дефектной моды ΔR_{max} при приложении магнитного поля от объемной доли МЖ: 1 – образцы без «Аэросила», 2 – образцы с «Аэросилом», 3 – теоретически рассчитанная кривая.

Расчет коэффициента отражения СВЧ излучения от многослойной структуры производился с использованием метода матриц передачи. Компоненты матрицы передачи через границу $z_{j,j+1}$ представимы в следующем виде:

$$T(z_{j,j+1}) = \begin{pmatrix} \frac{\gamma_{j+1} + \gamma_j}{2\gamma_{j+1}} e^{(\gamma_{j+1} - \gamma_j)z_{j,j+1}} & \frac{\gamma_{j+1} - \gamma_j}{2\gamma_{j+1}} e^{(\gamma_{j+1} + \gamma_j)z_{j,j+1}} \\ \frac{\gamma_{j+1} - \gamma_j}{2\gamma_{j+1}} e^{-(\gamma_{j+1} + \gamma_j)z_{j,j+1}} & \frac{\gamma_{j+1} + \gamma_j}{2\gamma_{j+1}} e^{-(\gamma_{j+1} - \gamma_j)z_{j,j+1}} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

$$\gamma_0^2 = \frac{\pi^2}{a^2} - \omega^2 \epsilon_0 \mu_0, \quad \gamma_j^2 = \frac{\pi^2}{a^2} - \omega^2 \epsilon_0 \mu_0 \epsilon_j \mu_j, \quad (3)$$

где j – номер слоя, $z_{j,j+1}$ – координата j -го слоя, отсчитываемая от границы первого слоя структуры, γ_0 , γ_j – постоянная распространения в вакууме и в участке волновода, содержащего слой с номером j , μ_0 , ϵ_0 – магнитная и электрическая постоянные, μ_j , ϵ_j – магнитная и диэлектрическая проницаемость материала, располагающегося в j -ом слое, A_j , B_j – коэффициенты, которыми определяются амплитуды падающей и отраженной волны, ω – круговая частота СВЧ излучения, a – размер широкой стенки волновода.

Коэффициент отражения через компоненты матрицы передачи определяется следующим образом:

$$R = -\frac{T_N[2,1]}{T_N[2,2]}, \quad (4)$$

$$T_N = \begin{pmatrix} T_N[1,1] & T_N[1,2] \\ T_N[2,1] & T_N[2,2] \end{pmatrix} = \prod_{j=N}^0 T_{j,(j+1)} = T(z_{N,N+1}) T(z_{N-1,N}) \dots T(z_{1,2}) T(z_{0,1}),$$

где T_N – матрица передачи через всю многослойную структуру.

Теоретические расчеты спектра коэффициента отражения СВЧ излучения, произведенные по формуле (4), показывают, что при возрастании объемной доли МЖ ожидается увеличение параметра ΔR_{max} (рис. 6, кривая 3). Однако экспериментальная кривая 1 на рис. 6 достигает максимального значения при объемной доле МЖ $v_{ff} = 0.2$, но при дальнейшем увеличении концентрации МЖ в композите наблюдается уменьшение подавления дефектной моды ΔR_{max} . Такая немонотонная зависимость может быть связана с изменением в процессе изготовления композита реологических свойств жидкой эмульсии, состоящей из ЭС и МЖ, и неоднородному распределению МЖ. В результате значительная часть МЖ оказывается с торца образца, вследствие чего эффективность взаимодействия СВЧ излучения с МЖ в композите снижается, т.к. электрическая компонента СВЧ волны типа TE_{10} достигает максимума в середине поперечного сечения волновода. Однородного распределения магнитной жидкости (рис. 6, кривая 2) можно добиться путем добавления в процессе изготовления композита небольших объемных долей (порядка 0.010) загустителя, например, пирогенного диоксида кремния – «Аэросил».

В третьем разделе было исследовано, как добавление УНТ влияет на свойства композита. Приведены результаты экспериментальных измерений электродинамических и электрофизических параметров композитов ЭС/МЖ/УНТ в сверхвысокочастотной области. Анализ свойств композитов осуществлялся по изменению положения дефектной моды СВЧ-фотонного кристалла (рис. 4) при размещении в центральном слое исследуемого образца.

Образцы изготавливались следующим образом: УНТ серии «Таунит-М» диспергировались в МЖ (объемная доля магнитных наночастиц составляла 0.14, а средний диаметр 10 нм) при воздействии ультразвука в течении часа. После чего происходило механическое перемешивание эпоксидной смолы, отвердителя и суспензии МЖ/УНТ. Далее, жидкий композит ЭС/МЖ/УНТ заливался в две силиконовые формы. Полимеризация композита в первой форме осуществлялась в магнитном поле, создаваемом постоянными магнитами. Полимеризация композита во второй форме происходила в отсутствии магнитного поля. Спустя сутки образцы извлекались из форм, торец подвергался механической обработке с целью достичь необходимой длины образца 23 мм.

Выявлено, что в объеме композита в процессе полимеризации в магнитном поле образуются агрегаты из УНТ и капель МЖ – нитевидные структуры (рис. 7б), ориентированные параллельно вектору индукции магнитного поля, обладающие анизотропией электрофизических параметров. Нитевидные структуры представляют собой трехкомпонентную среду: эпоксидная смола, магнитная жидкость, углеродные нанотрубки.

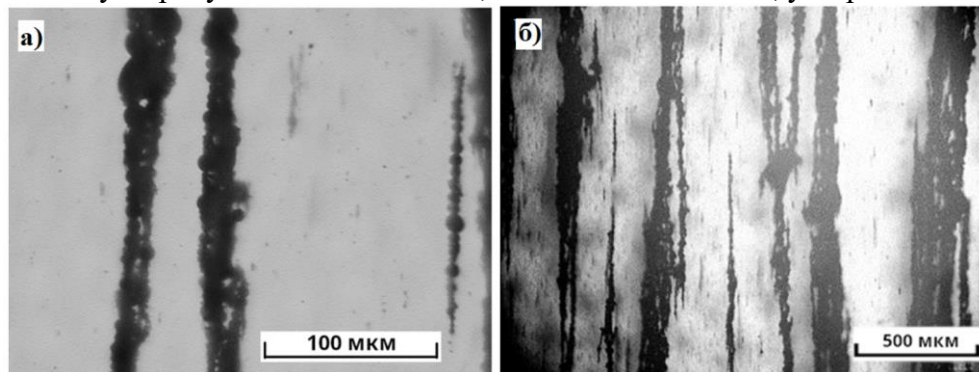


Рис. 7. Ориентированные цепочечные агрегаты (а) капель МЖ и нитевидные структуры (б), состоящие из МЖ и УНТ, возникающие при полимеризации композита в магнитном поле.

Если в центральном слое фотонного кристалла (рис. 4) расположить образец, полимеризация которого происходила в магнитном поле с вектором индукции, направленном параллельно электрическому вектору СВЧ волны типа TE_{10} , распространяющейся в прямоугольном волноводе, то наблюдается изменение положения минимума коэффициента отражения (рис. 8, кривая 2), относительно образца, полимеризация которого происходила в отсутствии магнитного поля (рис. 8, кривая 1). Такое смещение объясняется наличием ориентированных нитевидных структур, состоящих из МЖ и УНТ, которое приводит к возрастанию электропроводности и диэлектрической проницаемости образцов. Подавление дефектной моды ослабевает по мере того, как угол между электрическим вектором СВЧ волны и нитевидными структурами становится больше, что наблюдается как уменьшение величины минимума на частотной зависимости коэффициента отражения (рис. 8, кривая 3, 4).

По положению минимума коэффициента отражения СВЧ излучения от СВЧ-фотонной структуры были определены оптимальные значения индукции магнитного поля (100 мТл – 500 мТл), массовой доли (7...12 мас.%) компонента, состоящего из суспензии МЖ/УНТ, и отношения массы УНТ к массе магнитных наночастиц (~0.35), при которых наблюдается максимальная разница электрофизических параметров композитов ЭС/МЖ/УНТ, полимеризация которых происходила в присутствии магнитного поля и без магнитного поля.

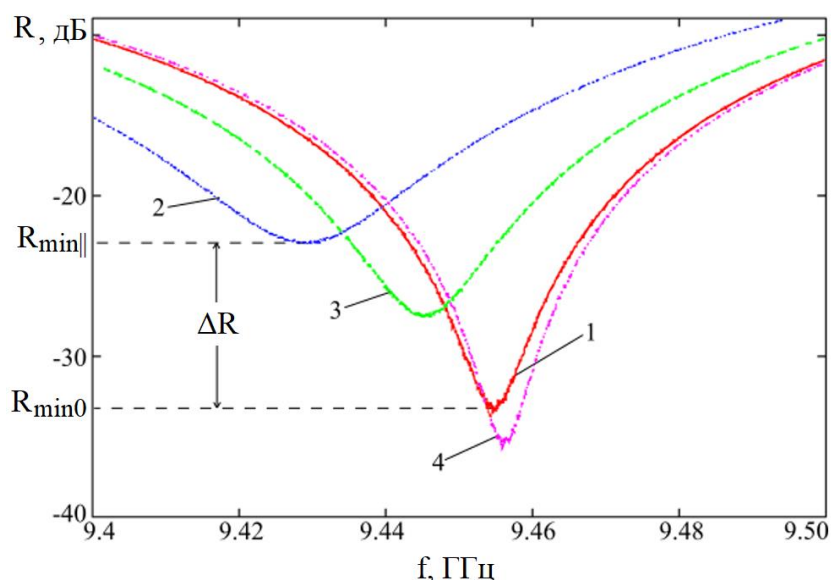


Рис. 8. Спектр коэффициента отражения от СВЧ-фотонной структуры с нарушенным центральным слоем, в котором размещались образцы, содержащие структуры с различной ориентацией: 1 – неориентированные структуры неправильной формы (образцы изготовленные без магнитного поля), 2 – нитевидные структуры, ориентированные под углом 0° относительно электрического вектора СВЧ волны, 3 – 45° , 4 – 90° .

В результате моделирования в программе Ansys HFSS спектров коэффициента отражения СВЧ излучения от фотонного кристалла, содержащего в качестве нарушения композит с ориентированными нитевидными структурами, состоящими из УНТ (ϵ_{cnt}) и графита (ϵ_{gr}), по экспериментальным данным была определена (табл. 1) диэлектрическая проницаемость и электропроводность нитей в продольном ($\epsilon_{||}$) и поперечном направлении ($\epsilon_{\perp}$), а также неориентированных включений (ϵ_0).

По данным, приведенным в табл. 1, была рассчитана степень анизотропии электрофизических параметров нитевидных структур в СВЧ диапазоне длин волн (табл. 2), т.е. отношение соответствующих величин электрофизических параметров (диэлектрической проницаемости и электропроводности), измеренных вдоль и поперек продольной оси.

Таблица 1. Значения электрофизических параметров включений, состоящих из УНТ и графита.

	ϵ'	ϵ''	$\sigma, \text{Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$
ϵ_{cnt0}	7.85	2.70	1.42
$\epsilon_{cnt }$	55.20	11.48	6.04
$\epsilon_{cnt\perp}$	4.47	1.09	0.57
ϵ_{gr0}	17.31	2.84	1.49
$\epsilon_{gr }$	23.49	4.15	2.18
$\epsilon_{gr\perp}$	12.91	2.16	1.13

Таблица 2. Степень анизотропии электрофизических параметров нитевидных структур из УНТ и графита.

Композит	$\epsilon'_{ }/\epsilon'_{\perp}$	$\sigma_{ }/\sigma_{\perp}$
ЭС/МЖ/УНТ	12.3	10.6
ЭС-МЖ-Гр	1.8	1.9

В четвертом разделе была предложена модель, учитывающая при расчете эффективных электрофизических параметров материалов распределение ориентированных проводящих нитей по объему образца, что позволяет производить расчет параметров

волоконистых композитов с неоднородным заполнением. Согласно разработанной модели, участок волновода, заполненный диэлектриком с ориентированными нитями, заменяется многослойной структурой (рис. 9). Такое приближение было названо – «модель возмущенных» слоев *MPL* (*Many Perturbation Layers*).

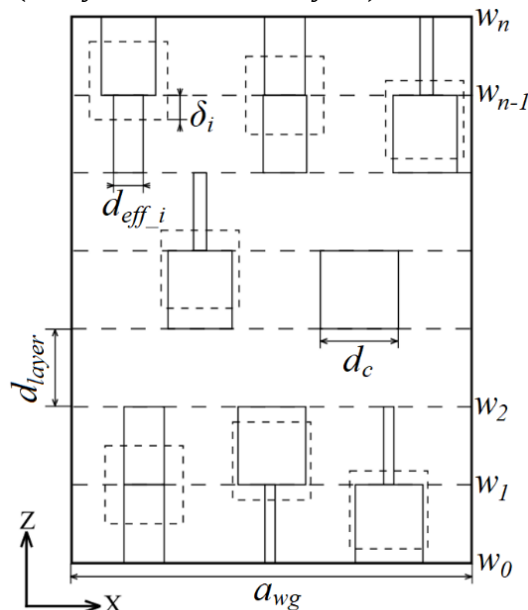


Рис. 9. Распределение нитей в плоскости XZ (продольное сечение волновода): квадраты, обозначенные пунктиром – нити в реальном композите; горизонтальные пунктирные линии – границы слоев многослойной модели; прямоугольники, обозначенные сплошными линиями – пластины, полученные заданием эффективной толщины, используемые в модели.

Толщина каждого слоя принималась равной толщине нити d_c (предполагалось, что все нити имеют одинаковую толщину). Количество слоев определялось из соотношения $n = \text{ceil}\left(\frac{d_{comp}}{d_c}\right)$, где ceil – функция округления в большую сторону, d_{comp} – толщина образца.

Из рис. 9 видно, что подавляющее большинство нитей попадает на границу между слоями. Введем для каждого слоя вместо нитей параллелепипеды с объемом равным объему той части включения, которая попадает в рассматриваемый слой. Для этого необходимо задать вдоль оси X эффективную ширину параллелепипеда d_{eff} . Теперь каждый слой можно рассматривать как материал матрицы с неоднородностями в поперечном сечении волновода в виде протяженных пластин различной толщины d_{eff_i} , вычисляемой по формуле:

$$d_{eff_i} = \frac{\delta_i \cdot d_c}{d_{layer}},$$

где δ_i – толщина части нити d_c , попадающей в исследуемый слой с шириной d_{layer} . Если $d_{layer} = d_c$, то $d_{eff_i} = \delta_i$.

Коэффициент отражения от такой многослойной структуры может быть рассчитан с использованием метода матриц передачи (4). Постоянная распространения каждого слоя $\gamma_i^{MPL} = \gamma'_i + i\gamma''_i$ при этом вычисляется с использованием теории возмущений в ходе решения численными методами обратной задачи (5):

$$S_{pert}(\omega, \gamma'_i, \gamma''_i) = 0, \quad (5)$$

$$S_{pert}(\omega, \gamma'_i, \gamma''_i) = (\gamma'_i + i\gamma''_i) - \gamma_m - \omega \frac{\sum_{k=1}^N \{\Delta \varepsilon \cdot E_m(x_k) \cdot \overline{E_m(x_k)} \cdot d_{eff_k} \cdot b_{wg}\}}{\sum_{j=1}^M \left\{ \left[\overline{E_m(x_j)} \times \left(\frac{(\gamma'_i + i\gamma''_i)}{\gamma_m} H_m(x_j) \right) \right] + \left[E_m(x_j) \times \overline{H_m(x_j)} \right] \right\} \cdot ds},$$

$$\Delta \varepsilon = \varepsilon_c - \varepsilon_m, \Delta \mu = \mu_c - \mu_m,$$

где N – количество пластин, x_k – координата пластины с номером k , d_{eff_k} – эффективная

толщина пластины с номером k , b_{wg} – ширина узкой стенки волновода (высота включения), ε_c , μ_c – диэлектрическая и магнитная проницаемость материала (нити), выступающего в качестве возмущения, γ_m – постоянная распространения, рассчитанная по формуле (3), ε_m , μ_m – диэлектрическая и магнитная проницаемость невозмущенного волновода (матрицы композита). Суммирование в знаменателе производится по всей площади волновода с малым шагом ds .

Компоненты электрического и магнитного полей E_m и H_m волны типа TE_{10} задаются известными соотношениями:

$$\begin{aligned} E_y(x, \omega) &= -\frac{\omega\pi}{a} \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right), \\ H_x(x, \omega) &= -\frac{\sqrt{-1} \cdot \gamma_m(\omega) \cdot \pi}{\mu\mu_0 a} \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right), \\ H_z(x, \omega) &= -\frac{\sqrt{-1} \cdot \pi^2}{\mu\mu_0 a^2} \cos\left(\frac{\pi x}{a}\right), \\ E_x &= H_y = E_z = 0. \end{aligned}$$

Для удобства записи многослойных структур и составления матриц передачи было впервые предложено использовать специальные обозначения:

1. Одиночный слой обозначим через $\overbrace{z_i S_i}^{\alpha}_d$, где в группирующем знаке снизу будем записывать толщину слоя d , в группирующем знаке сверху α обозначает либо название материала, из которого состоит слой, либо интересующий параметр, например, постоянную распространения, нижний индекс i – номер слоя, а верхний индекс z_i – координату левой границы слоя.

2. Группу из периодически повторяющихся слоев обозначим:

$$\overbrace{z_i \prod_i^4}^{\alpha|\beta}_{a|b} = \underbrace{\overbrace{z_i S_4}^{\alpha}}_a \underbrace{\overbrace{z_{i-a} S_3}^{\beta}}_b \underbrace{\overbrace{z_{i-a-b} S_2}^{\alpha}}_a \underbrace{\overbrace{z_{i-2a-b} S_1}^{\beta}}_b,$$

где правый верхний индекс 4 означает общее количество чередующихся слоев толщиной a и b с параметрами α и β . Нижний индекс i равен номеру слоя в рамках объемлющей структуры, в которую помещается периодическая группа, а верхний левый индекс z_i – координата левой границы периодической группы в рамках объемлющей структуры.

3. Непериодическую группу из n слоев с разными толщинами d_j и параметрами α_j обозначим через $\overbrace{z_i U_i^n}^{\alpha_j}_{d_u}$, крайние слои справа и слева в этой структуре имеют параметры α_1 и α_n , соответственно. Общая толщина группы d_u обозначена в нижнем группирующем знаке.

Для увеличения точности определения параметров композит, представленный многослойной моделью MPL из n слоев, размещался в центральном слое СВЧ-фотонного кристалла. Итоговая схема такой структуры записывается в следующем виде:

$$\underbrace{\overbrace{X_6}^{\gamma_{air}}}_{\infty} \underbrace{\overbrace{z_5 \prod_5^4}^{\gamma_p | \gamma_f}}_{d_1 | d_2} \underbrace{\overbrace{z_4 S_4}^{\gamma_p}}_{d_1} \overbrace{\left(\underbrace{\overbrace{z_3 = z_4 - d_1}^{\gamma_n^{MPL}}}_{d_{last}} \underbrace{\overbrace{z_{n-1} U_1^{n-1}}^{\gamma_i^{MPL}}}_{d_c} \right)}_3 \underbrace{\overbrace{z_3 - d_{comp} S_2}^{\gamma_p}}_{d_1} \underbrace{\overbrace{z_1 \prod_1^4}^{\gamma_f | \gamma_p}}_{d_2 | d_1} \underbrace{\overbrace{z_0 = 0 X_0}^{\gamma_{air}}}_{\infty} <, \quad (6)$$

где знак меньше означает направление распространения СВЧ волны (справа налево).

Частотные зависимости коэффициента отражения СВЧ излучения от фотонной структуры (6), рассчитанные методом матриц передачи (4) с учетом (5), т.е. разработанной модели MPL , с уменьшением толщины нитей (при фиксированной объемной доле нитей), т.е. с увеличением их количества, согласуются (рис. 10) с результатами моделирования

методом конечных элементов *FEM* (Finite Element Method), произведенным в программе электродинамического 3D-моделирования Ansys HFSS. При количестве нитей более 1.5 шт/мм² отклонение частоты минимума коэффициента отражения не превышает 0.05%, а отклонение величины минимума не превышает 1%. В качестве матрицы использовалась эпоксидная смола ($\epsilon_m = 3.2 - 0.05i$), параметры нитей принимались близкими к значениям, определенным по экспериментальным данным из раздела 3 ($\epsilon'_c = 50, \sigma_c = 5 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$).

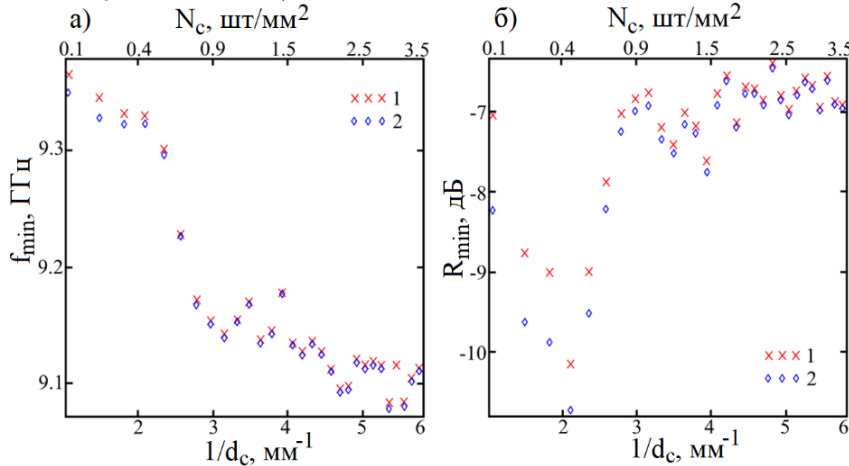


Рис. 10. Зависимость от обратной толщины нитей (сверху указано соответствующее количество нитей) частоты $f_{\min}$ (а) и величины $R_{\min}$ (б) минимума коэффициента отражения от фотонной структуры, при размещении в центральном слое композита с параметрами нитей $\epsilon'_c = 50$, $\sigma_c = 5 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$, расчет производился с использованием: 1 – метода конечных элементов *FEM*, 2 – модели «возмущенных слоев» *MPL*. Объемная доля нитей в композите $\nu_c = 10\%$.

Для оценки погрешности определения электродинамических параметров вычислялось относительное отклонение частоты и величины минимума коэффициента отражения СВЧ-излучения от периодической структуры, содержащей в качестве центрального слоя композит с ориентированными нитями, рассчитанных по модели *MPL*

от моделирования в *HFSS*, по формулам $\delta f_{\min}^{MPL} = \frac{\sqrt{(f_{\min}^{MPL} - f_{\min}^{FEM})^2}}{f_{\min}^{FEM}} \cdot 100\%$ и $\delta R_{\min}^{MPL} = \frac{\sqrt{(R_{\min}^{MPL} - R_{\min}^{FEM})^2}}{R_{\min}^{FEM}} \cdot 100\%$.

Выявлено, что модель *MPL* при объемных долях нитей $\nu_c < 5\%$ является хорошим приближением для расчета коэффициента отражения СВЧ излучения от композитов, содержащих проводящие ориентированные нити. При параметрах нитей $\epsilon'_c < 50$, $\sigma_c < 50$ и полимерной матрицы $\epsilon_m = 3.2 - 0.05i$ погрешность определения минимума коэффициента отражения составляет $\delta f_{\min}^{MPL} < 0.2\%$, $\delta R_{\min}^{MPL} < 2.0\%$ (рис. 11), что приводит к погрешности определения электрофизических параметров композита менее 5% (рис. 12).

Модель *MPL*, в отличие от модели эффективных сред, таких как Максвелла-Гарнетта, применима для расчета коэффициента отражения от неоднородных композитов. В качестве примера был рассмотрен композит, в котором включения смещены от узких стенок волновода к середине широкой стенки (рис. 13а). Такого рода заполнение было получено экспериментально при использовании локализованного в пространстве магнитного поля, которое привело к неоднородному распределению в объеме образца нитевидных проводящих структур, образующихся из УНТ и магнитных наночастиц, при полимеризации полимерной матрицы, содержащей суспензию МЖ/УНТ. На рис. 13 использованы следующие обозначения: V_0 – общий объем композита, V_A – центральная область волновода, в котором происходит распределение нитей, R_A минимум коэффициента отражения при неоднородном заполнении (нити распределяются в объеме V_A). R_0 – при однородном заполнении ($V_A = V_0$).

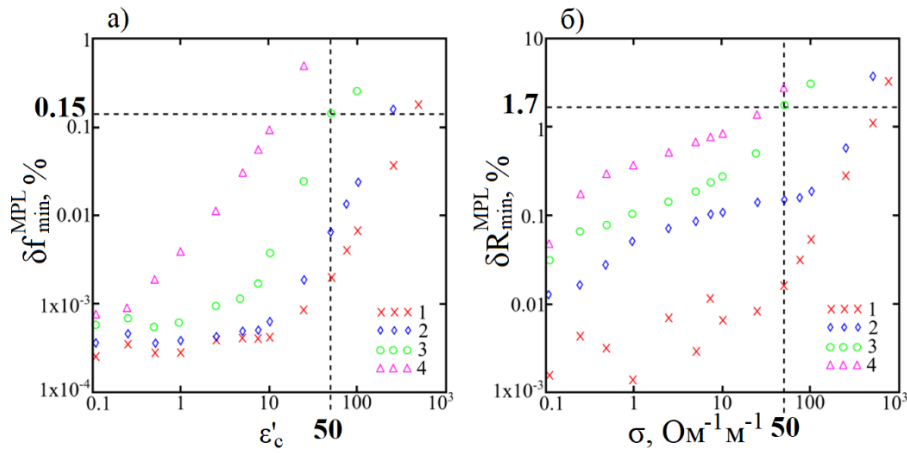


Рис. 11. Зависимость погрешности расчета с использованием модели *MPL* частоты минимума коэффициента отражения от диэлектрической проницаемости нитей ε'_c (а) и величины минимума от проводимости нитей σ_c (б), при количестве нитей $N_c = 1.6$ шт/мм² и объемных долях включений v_c : 1 – 0.5%, 2 – 1.0%, 3 – 5.0%, 4 – 10.0%.

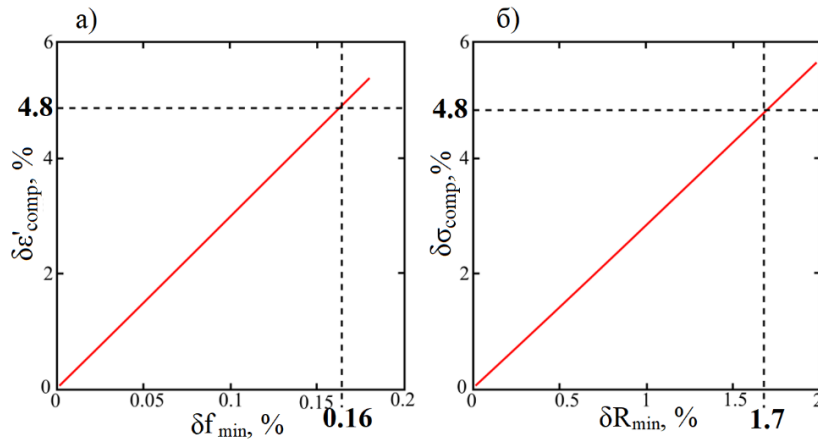


Рис. 12. Зависимость погрешности определения эффективной диэлектрической проницаемости $\delta\varepsilon'_{comp}$ (а) и электропроводности $\delta\sigma_{comp}$ (б) композита от погрешности измерения частоты и величины минимума коэффициента отражения СВЧ излучения от периодической структуры, содержащей в центральном слое исследуемый композит.

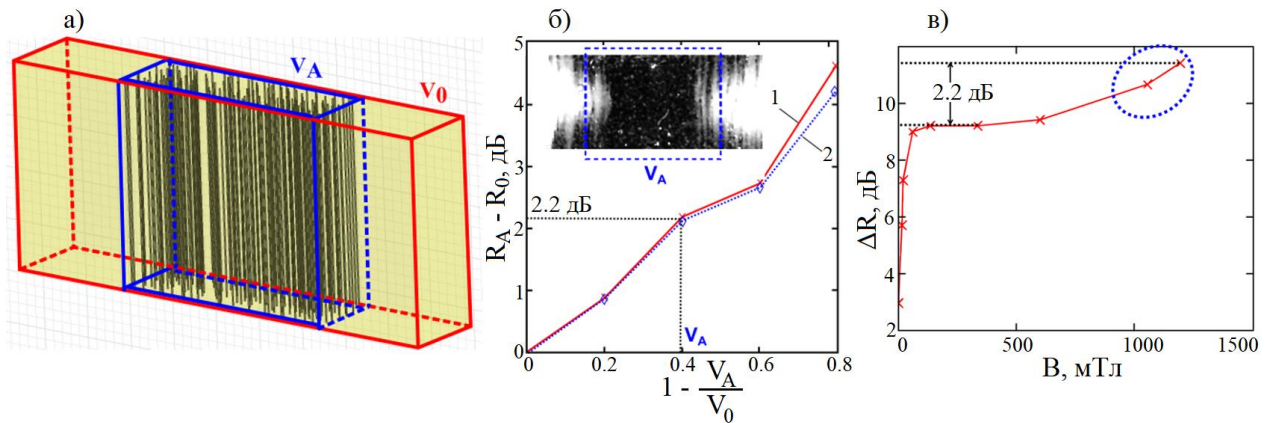


Рис. 13. Неоднородное заполнение волновода (а); разность минимумов коэффициента отражения между неоднородным и однородным заполнением от приведенного объема (б), расчет спектра производился: 1 – в программе Ansys HFSS, 2 – с использованием модели *MPL*; экспериментальная зависимость (из раздела 3) степени подавления дефектной моды от величины индукции магнитного поля, при котором происходила полимеризация композита (в).

Чем нити ближе к середине, тем величина минимума коэффициента отражения больше (рис. 13б, в), что обусловлено распределением электрического поля СВЧ волны в волноводе, которое в середине широкой стенки принимает максимальное значение.

Преимущество разработанной модели *MPL* заключается в возможности расчета неоднородных структур с большим количеством нитей микронных размеров, где другие методы моделирования требуют, как минимум, на порядок больших временных затрат.

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

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Экспериментально установлено, что глубина амплитудной модуляции линейно поляризованного оптического излучения возрастает с увеличением длины волны (450, 550 и 650 нм) лазерного излучения, проходящего через слой композита МЖ/УНТ, при воздействии магнитного поля с изменяющимся направлением вектора индукции. Максимальная величина модуляции через ячейку, содержащую МЖ без УНТ, достигала 15% при длине волны лазерного излучения 650 нм. Добавление многостенных УНТ в МЖ приводит к росту (примерно в полтора раза) глубины модуляции.

2. Реализовано управление частотными характеристиками СВЧ фотонного кристалла, при использовании в качестве центрального слоя композита эпоксидная смола/магнитная жидкость (ЭС/МЖ), путем приложения к центральному слою магнитного поля с различной величиной индукции. Увеличение индукции магнитного поля до значений порядка 300 мТл приводит к подавлению дефектной моды до предельного значения, дальнейшее увеличение магнитного поля приводит к восстановлению дефектной моды.

3. Экспериментально установлено, что подавление дефектной моды СВЧ фотонного кристалла с нарушением в виде композита ЭС/МЖ при приложении магнитного поля возрастает с увеличением объемной доли МЖ в диапазоне значений 0.0–0.3, при объемных долях МЖ более 0.3 происходит изменение реологических свойств композита, вследствие чего подавление дефектной моды уменьшается, добавление загустителя «Аэросил» (пирогенный диоксид кремния) позволяет увеличить подавление до 25.5 дБ.

4. Показано, что в процессе полимеризации при приложении магнитного поля в композите ЭС/МЖ/УНТ (для сравнения вместо УНТ также использовался графит) образуются вытянутые проводящие нити, что приводит к появлению анизотропии комплексной диэлектрической проницаемости композитов. Степень анизотропии электрофизических параметров композита, содержащего структуры из МЖ/УНТ, выше, чем из МЖ/Графита.

5. Экспериментально установлено, что дефектная мода на спектре коэффициента отражения СВЧ-волны от фотонной структуры подавляется сильнее, при размещении в качестве центрального слоя композита ЭС/МЖ/УНТ(Графит), полимеризация которого происходила в присутствии магнитного поля с вектором индукции, ориентированном параллельно электрическому вектору СВЧ-волны, чем при ортогональной ориентации. Такая особенность связана с наличием ориентированных проводящих нитевидных структур.

6. По положению минимума коэффициента отражения СВЧ-излучения от СВЧ фотонной структуры определены оптимальные значения индукции магнитного поля (100 мТл – 500 мТл), массовой доли компонента (7...12 мас.%), состоящего из суспензии МЖ/УНТ, и отношения массы УНТ к массе магнитных наночастиц (~0.35), при которых достигается максимальная разница между параметрами композитов ЭС/МЖ/УНТ, полимеризация которых происходила в присутствии магнитного поля и без магнитного поля.

7. Установлено наличие порогового уровня (~12 мас.%) концентрации суспензии МЖ/УНТ, диспергированной в эпоксидной смоле, при превышении которого, процессы формирования структуры ухудшаются, что, вероятно, обусловлено изменениями реологических характеристик суспензии в процессе создания композита, что ведет к снижению анизотропии свойств композита.

8. Выявлено, что при отношении массы УНТ к массе магнитных наночастиц более 0.35 подавление дефектной моды на спектре коэффициента отражения СВЧ-излучения от

периодической структуры при использовании в качестве нарушения композита ЭС/МЖ/УНТ, полимеризация которого происходила в присутствии магнитного поля, уменьшается (на 5 дБ при отношении 0.7).

9. Установлено, что при нахождении в области действия локализованного магнитного поля магнитная жидкость стягивается в область концентрации магнитных силовых линий, что позволяет управлять степенью неоднородности заполнения композита. При размещении такого композита в качестве нарушенного слоя фотонной структуры можно добиться увеличения коэффициента отражения СВЧ-излучения. При этом дефектная мода подавляется сильнее (дополнительно на 2 дБ при размещении композита, полимеризация которого происходила при индукции магнитного поля 1200 мТл).

10. Разработан экспериментальный метод с использованием СВЧ фотонного кристалла, позволяющий в результате решения обратной задачи контролировать эффективные электрофизические параметры композитов с нитевидными включениями, а также степень анизотропии электрофизических параметров самих включений. Установлено, что нитевидные структуры из суспензии МЖ/УНТ, образующиеся при приложении магнитного поля в эпоксидной смоле в процессе её полимеризации, обладают анизотропией электрофизических свойств, действительная и мнимая части диэлектрической проницаемости отличаются более чем в 10 раз при измерениях в ортогональных направлениях, в то время как для композитов с графитом данный показатель не превосходит двух.

11. Разработана физическая модель, позволяющая свести участок волновода, заполненный диэлектриком с ориентированными нитями, к многослойной структуре – «модель возмущенных» слоев MPL. Определение коэффициента отражения от данной структуры базируется на методе матриц передачи, а для нахождения постоянной распространения в каждом слое привлекается теория возмущений. Ошибка вычисления минимума коэффициента отражения составляет менее 1% при низких объемных концентрациях включений или при незначительном отличии комплексной диэлектрической проницаемости нитей от проницаемости матрицы. Модель применима для расчета структур со множеством микронитей толщиной менее 15 мкм, где стандартные численные методы требуют на порядок большего времени вычислений.

12. Разработанная модель «возмущенных слоев» MPL позволяет рассчитывать диэлектрическую проницаемость и электропроводность композитов, содержащих тонкие нитевидные включения с различными электрофизическими параметрами и толщинами менее 200 мкм, ориентированными параллельно электрической компоненте СВЧ-волны в прямоугольном волноводе, в том числе, имеющих неоднородное заполнение. Модель позволила объяснить увеличение подавления дефектной моды, при размещении в СВЧ фотонном кристалле в качестве центрального слоя композита ЭС/МЖ/УНТ, полимеризация которого происходила в локализованном магнитном поле, при котором наблюдалось неоднородное распределение нитей по объему образца.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ИЗЛОЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ:

В научных изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ

1. Постельга А.Э., Игонин С.В., Агапова Ю.А. Использование магнитных композитов для создания управляемых фотонных кристаллов // Известия РАН. Серия физическая. – 2024. – Т. 88. – № 10. – С. 1584–1592. DOI: 10.31857/S0367676524100137

2. Постельга А.Э., Игонин С.В., Бочкова Т.С., Нагорнов Г.М., Скрипаль А.В. Модуляция лазерного излучения суспензией углеродных нанотрубок в магнитной жидкости // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. – 2024. – Т. 24. – № 2. – С. 171–179. DOI: <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2024-24-2-171-179>

3. Постельга А.Э., Игонин С.В. Измерение степени анизотропии электрофизических свойств композита эпоксидная смола – магнитная жидкость – углеродные нанотрубки // Дефектоскопия. – 2025. – № 2. – С. 53–67. DOI:10.31857/S0130308225020053

4. Постельга А.Э., Игонин С.В. Расчет эффективной диэлектрической проницаемости и электропроводности композитов, содержащих проводящие ориентированные нити // ЖТФ. – 2026. – Т. 96. – № 1. – С. 71–91. DOI: 10.61011/JTF.2026.01.62039.62-25

В других изданиях

5. Усанов Д.А., Постельга А.Э., Бочкова, Т.С., Гаврилин В.Н., Игонин С.В. Модуляция поляризованного оптического излучения, проходящего через магнитную жидкость с нанотрубками, при воздействии магнитного поля с изменяющимся направлением // Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро– и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами: Материалы четвертой Всероссийской научной школы–семинара / под ред. проф. Д. А. Усанова. Саратов: Изд-во «Саратовский источник». – 2017. – С. 31–34.

6. Усанов Д.А., Постельга А.Э., Бочкова Т.С., Игонин С.В. Применение теории возмущений для решения обратной задачи по определению параметров магнитной жидкости с учетом агломератов ферромагнитных наночастиц// Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро– и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами: Сборник статей пятой Всероссийской научной школы–семинара / под ред. проф. Д. А. Усанова. Саратов: Изд-во «Саратовский источник». – 2018. – С.126–129

7. Бочкова Т.С., Игонин С.В., Усанов Д.А., Постельга А.Э. Влияние учета агломератов ферромагнитных наночастиц на определение параметров магнитной жидкости по температурной зависимости спектра отражения сверхвысокочастотного излучения // 18–я Международная Плесская научная конференция по нанодисперсным магнитным жидкостям. – 2018. – С. 341–352.

8. Усанов Д.А., Постельга А.Э., Бочкова, Т.С., Гаврилин В.Н., Игонин С.В. Модель взаимодействия магнитной жидкости, помещенной во внешнее магнитное поле, с электромагнитной волной СВЧ-диапазона // В сборнике: Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро– и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами: Сборник статей шестой Всероссийской научной школы–семинара / под ред. проф. Д. А. Усанова. Саратов: Изд-во «Саратовский источник». – 2019. – С.151–155.

9. Постельга А.Э., Скрипаль Ал.В., Игонин С.В., Карева А.А. Управляемый магнитным полем фотонный кристалл СВЧ-диапазона // В сборнике: Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро– и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами: Сборник статей седьмой Всероссийской научной школы–семинара / под ред. проф. Ал.В. Скрипаля. Саратов: Изд-во «Саратовский источник». – 2020. – С. 71–75.

10. Постельга А.Э., Скрипаль Ал.В., Игонин С.В., Простак Е.П. Применение управляемого магнитным полем фотонного кристалла свч-диапазона для определения параметров мелкодисперсных сред // В сборнике: Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро– и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами: Сборник статей восьмой Всероссийской научной школы–семинара / под ред. проф. Ал.В. Скрипаля. Саратов: Изд-во «Саратовский источник». – 2021. – С. 126-129.

11. Постельга А.Э., Игонин С.В., Агапова Ю.А. О возможности управления электрофизическими характеристиками фотонного кристалла при использовании в качестве нарушенного слоя магнитного композита // В сборнике: Сборник научных трудов VIII Ставропольской международной конференции по магнитным коллоидам ISCMC2023. Ставрополь. – 2023. – С. 91–98.

12. Постельга А.Э., Игонин С.В. Особенности отражения СВЧ-излучения от композита эпоксидная смола - магнитная жидкость - углеродные нанотрубки // В книге: Нанотехнологии и наноматериалы: современное состояние и перспективы развития. Сборник тезисов IV

Международной научно-технической конференции. Волгоград. – 2024. – С. 30–32.

13. Постельга А.Э., Игонин С.В., Агапова Ю.А. Анизотропия коэффициента отражения СВЧ излучения от композита эпоксидная смола - магнитная жидкость - углеродные нанотрубки // В сборнике: Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами. Сборник статей одиннадцатой Всероссийской научной школы-семинара / под ред. проф. Ал.В. Скрипаль – Саратов: Изд-во «Саратовский источник». – 2024. – С. 174–176.

14. Постельга А.Э., Игонин С.В., Агапова Ю.А. Модель волокнистого композита для расчета частотной зависимости коэффициента отражения СВЧ излучения. // В сборнике: Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами. Сборник статей двенадцатой Всероссийской научной школы-семинара / под ред. проф. Ал.В. Скрипаль. Саратов: Изд-во «Саратовский источник». – 2025. – С. 209–212

Цитируемая литература

1. Xu B., Chen R.; Zhou J., Liang J. Recent Progress and Challenges Regarding Carbon Nanotube On-Chip Interconnects // Micromachines. – 2022. – V. 13. – P. 1148.

2. Stergiou C.A., Koledintseva M.Y., Rozanov K.N. Hybrid polymer composites for electromagnetic absorption in electronic industry // Chapter in book – Hybrid Polymer Composite Materials: Applications: Elsevier Inc., 2017. – P. 53-106.

3. Elbakyan L., Zaporotskova I. Composite Nanomaterials Based on Polymethylmethacrylate Doped with Carbon Nanotubes and Nanoparticles: A Review // Polymers . – 2024. – V. 16. – P. 1242.

4. Kolosov D.A., Mitrofanov V.V., Slepchenkov M.M., Glukhova O.E.. Thin graphene–nanotube films for electronic and photovoltaic devices: DFTB modeling // Membranes. – 2020. – V. 10. - № 11. – P. 1-14.

5. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Романов А.В. Управление СВЧ-характеристиками композитных материалов с наполнителем из углеродных нанотрубок воздействием ультрафиолетового излучения // ЖТФ. – 2013. – Т. 83. - № 3. – С. 91-95.

6. Rozanov K.N., Osipov A.V., Petrov D.A., Starostenko S.N., Yelsukov E.P. The effect of shape distribution of inclusions on the frequency dependence of permeability in composites // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2009. – V. 321. - № 7. – P. 738-741.

7. Наджарьян Т.А., Костров С.А., Крамаренко Е.Ю. Магнитоактивные полимерные композиты: достижения и перспективы развития // ВМУ. Серия 3. Физика. Астрономия. – 2024. - Т. 79. - № 6. С. 83-99.

8. Romyen N., Thongyai S., Praserttham P. Alignment of Carbon Nanotubes in Polyimide Under Electric and Magnetic Fields // Journal of Applied Polymer Science. – 2012. - V. 123. – P. 3470–3475.

9. Воробьева Е.А., Евсеев А.П., Петров В.Л., Шемухин А.А., Чеченин Н.Г. Проводимость в композитных материалах на основе ориентированных углеродных нанотрубок // ВМУ. Серия 3. Физика. Астрономия. - 2021. - № 1. - С. 23-29.

10. Шлиомис М.И. Магнитные жидкости // УФН. – 1974. - Т. 112. - В. 3. - С. 427-458.

11. Усанов Д.А., Постельга А.Э., Бочкова Т.С., Гаврилин В.Н. Динамика агломерации наночастиц в магнитной жидкости при изменении магнитного поля // ЖТФ. – 2016. – Т. 86. В. 3. С. 146–148.

12. Jin J., Song D., Geng J., Jing D. Time-dependent scattering of incident light of various wavelengths in ferrofluids under external magnetic field // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2018. – V. 447. – P. 124-133.

13. Вивчарь В.И., Ерин К.В., Спектры оптических эффектов в магнитных жидкостях, содержащих агрегаты наночастиц // Оптика и спектроскопия. – 2024. – Т. 132. – В. 3. – С. 335–341.

14. Akyurekli M., Gonulol M., Bayram A., Yarici I., Ozturk Y. Investigation of optical properties of ferrofluid by using magneto-optical transmission and linear dichroism // IEEE 7th International Conference Nanomaterials: Application & Properties (NAP). – 2017. - P. 02MAN10-1-02MAN10-4.

15. Philip J., Laskar. J.M. Optical Properties and Applications of Ferrofluids - A Review // J. Nanofluids. - 2012. - V. 1. - № 1. - P. 3-20.

16. Vales-Pinzón C., Alvarado-Gil J.J., Medina-Esquivel R., Martínez-Torres P. Polarized light transmission in ferrofluids loaded with carbon nanotubes in the presence of a uniform magnetic field // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2014. - V. 369. – P. 114–121.
17. Усанов Д.А., Постельга А.Э., Бочкова, Т.С., Гаврилин В.Н., Игонин С.В. Модуляция поляризованного оптического излучения, проходящего через магнитную жидкость с нанотрубками, при воздействии магнитного поля с изменяющимся направлением // *ЖТФ*. – 2017. – Т. 87. – № 6. – С. 1432–1435.
18. Элбакян Л.С., Запороцкова И.В. Исследование проводящих свойств композитных полимерных материалов на основе поливинилпирролидона, допированных одно- и двухслойными нанотрубками // *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика*. – 2025. - Т. 25. – В. 4. – С. 495-504.
19. Hekmatara H., Seifi M., Forooghi. K Microwave absorption property of aligned MWCNT/Fe₃O₄ // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2013. – V. 346. – P. 186-191.
20. Kim I.T., Tannenbaum A., Tannenbaum R.. Anisotropic conductivity of magnetic carbon nanotubes embedded in epoxy matrices // *Carbon*. – 2011. – V. 49. – P. 54-61.
21. Диканский Ю.И., Нечаева О.А. Особенности устойчивости микрокапельной структуры магнитной жидкости в электрическом и магнитном полях // *Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. Приложение*. – 2004. - № 6. – С. 37-41.
22. Ivey M., Liu J., Zhu Y., Cutillas S. Magnetic-field-induced structural transitions in a ferrofluid emulsion // *Physical review E*. – 2000. – V. 63. – P. 011403.
23. Filipcsei G., Csetneki I., Szilágyi A., Zrínyi M. Magnetic Field-Responsive Smart Polymer Composites // *Adv Polym Sci*. – 2007. - V. 206. - P. 137–189.
24. Pant R.P., Dhawan S.K., Kataria N.D., Suri D.K.. Investigations on ferrofluid-conducting polymer composite and its application // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2002. - V. 252. - P. 16–19.
25. Царев В.А., Мирошниченко А.Ю., Гнусарев А.В., Акафьева Н.А., Чернышев М.А. Миниатюрные двухззорные фотонно-кристаллические резонаторы с фрактальными резонансными элементами, выполненными на печатной плате // *Радиотехника*. – 2020. - Т. 84. – №. 7(14). – С. 41-49.
26. Скрипаль А.В., Пономарев Д.В., Шаронов В.Е. Дефектные моды фотонного кристалла с проводящим нанослоем на изолирующей подложке // *ЖТФ*. – 2025. - Т. 95. – В. 1. – С. 150-158.
27. Р. А. Князьков, С. Н. Старостенко, А. В. Артемова, Комаров И.В., Долматов А.В., Ширяев А.О., Иванов П.А., Осипов А.В., Петров Д.А., Маклаков С.А., Зезюлина П.А., Бузников Н.А., Маклаков С.С. Стеклометаллический порошковый ферромагнитный материал для применения в композитах, предназначенных для СВЧ диапазона // *Современная электродинамика*. – 2024. – № 4(12). – С. 21-29.
28. Апресян Л.А., Власов Д.В., Задорин Д.А., Красовский В.И. О модели эффективной среды для частиц со сложной структурой // *ЖТФ*. – 2017. – Т. 87. – В. 1. – С. 10-17.
29. Глухова О.Е., Гусятников В.Н., Давидович М.В., Ларионова О.В., Нефедов И.С., Слепченков М.М., Шунаев В.В. Графен-нанотрубные композиты: математическое моделирование. – М. : ООО "Русайнс", 2021. – 140 с.
30. Постельга А.Э., Игонин С.В. Измерение степени анизотропии электрофизических свойств композита эпоксидная смола – магнитная жидкость – углеродные нанотрубки // *Дефектоскопия*. – 2025. - № 2. - С. 53-67.
31. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В., Боголюбов А.С., Скворцов В.С., Мерданов М.К. Волноводные фотонные кристаллы с характеристиками, управляемыми р-і-п-диодами // *Известия высших учебных заведений. Электроника*. – 2010. - № 1. - С. 24-29.

Игонин Семен Владимирович

**УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИМИ И
ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ КОМПОЗИТНЫХ
МАТЕРИАЛОВ С МАГНИТНЫМИ НАНОЧАСТИЦАМИ И
УГЛЕРОДНЫМИ НАНОСТРУКТУРАМИ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Подписано в печать «22» июня 2026 г. Формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Гарнитура Times. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1.15

Тираж 100 экз. Заказ № 88453

Типография «Техно-Декор».

Саратов, Московская, 160, тел.: 77-07-48, www.sar-print.ru.