

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научные руководители:

кандидат физико-математических наук

Постельга Александр Эдуардович

доктор физико-математических наук, профессор

Скрипаль Александр Владимирович

Саратов 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ КОМПОЗИТОВ С УПРАВЛЯЕМЫМИ ПАРАМЕТРАМИ, СОДЕРЖАЩИХ УГЛЕРОДНЫЕ НАНОТРУБКИ И МАГНИТНУЮ ЖИДКОСТЬ.....	18
1.1 Современное состояние исследований композитных материалов, содержащих УНТ	18
1.2 Взаимодействие СВЧ-излучения с композитами, содержащими углеродные нанотрубки	22
1.3 Использование магнитных жидкостей для управления параметрами композитов.	28
1.4 Теоретические модели, описывающие электрофизические параметры композитов с углеродными нанотрубками.	33
1.5 Методы исследования электрофизических параметров композитных материалов	42
2 УПРАВЛЕНИЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЧАСТОТНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩЕГО С КОМПОЗИТАМИ НА ОСНОВЕ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ	48
2.1 Взаимодействие лазерного излучения с различными длинами волн с композитами на основе магнитной жидкости, содержащей углеродные нанотрубки	48
2.1.1 Теоретическое обоснование методики измерений	48
2.1.2 Экспериментальное определение глубины модуляции лазерного излучения при прохождении через композит магнитная жидкость – углеродные нанотрубки	50
2.1.3 Результаты исследований и их обсуждение	53

2.2	Взаимодействие СВЧ-излучения с композитами эпоксидная смола / магнитная жидкость.....	56
2.2.1	Методика проведения эксперимента	57
2.2.2	Математическая модель взаимодействия электромагнитного излучения СВЧ-диапазона с одномерными волноводными фотонными кристаллами, содержащими в качестве нарушения композит эпоксидная смола / магнитная жидкость.....	62
2.2.3	Результаты исследований и их обсуждение	66
3	ИЗМЕРЕНИЕ СТЕПЕНИ АНИЗОТРОПИИ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОМПОЗИТА ЭПОКСИДНАЯ СМОЛА/МАГНИТНАЯ ЖИДКОСТЬ/УГЛЕРОДНЫЕ НАНОТРУБКИ.....	72
3.1	Исследуемые образцы.....	73
3.2	Проведение эксперимента.....	75
3.3	Анализ экспериментальных данных	77
3.3.1	Влияние направления индукции магнитного поля, при котором происходила полимеризация композитов.....	77
3.3.2	Влияние величины индукции магнитного поля, при котором происходила полимеризация композитов.....	80
3.3.3	Влияние объемной доли суспензии магнитная жидкость – углеродные нанотрубки	81
3.3.4	Влияние отношения массы углеродных нанотрубок к массе магнитной жидкости	82
3.4	Моделирование фотонной структуры и расчет степени анизотропии комплексной диэлектрической проницаемости композитов.....	83

4 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СВЧ-ДИАПАЗОНА С ОДНОМЕРНЫМИ ВОЛНОВОДНЫМИ ФОТОННЫМИ КРИСТАЛЛАМИ, СОДЕРЖАЩИМИ В КАЧЕСТВЕ НАРУШЕНИЯ СЛОЙ С НИТЕВИДНЫМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ	92
4.1 Моделирование эксперимента	93
4.2 Теоретическое описание	94
4.2.1 Способ обозначений для записи многослойных структур	94
4.2.2 Пример составления матрицы передачи с использованием введенных обозначений.	95
4.3 Модель «возмущенных слоев» (MPL)	96
4.3.1 Учет распределения включений вдоль оси Z	97
4.3.2 Учет распределения включений вдоль оси X	99
4.3.3 Запись матрицы передачи для модели «возмущенных слоев» MPL	101
4.4 Пластинчатая модель композита (EPM)	102
4.5 Расчет эффективной диэлектрической проницаемости	103
4.6 Результаты моделирования и обсуждение	105
4.6.1 Применимость модели «возмущенных слоев» MPL для расчета спектра коэффициента отражения.	106
4.6.2 Определение электрофизических параметров однородных композитов с использованием пластинчатой модели EPM.	110
4.6.3 Сравнение результатов расчета параметров при использовании различных моделей.	114
4.6.4 Расчет коэффициента отражения от неоднородного композита.	116
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	120
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	124

ВВЕДЕНИЕ

В последние несколько десятилетий наблюдается экспоненциальный прогресс развития кремниевой микроэлектроники. В значительной степени эти достижения стали результатом непрерывного масштабирования, то есть миниатюризации, электронных устройств. Однако масштабирование не может продолжаться вечно; ряд фундаментальных научных и технологических ограничений накладывает ограничения на размеры кремниевых устройств.

Наноматериалы обладают значительно улучшенными свойствами по сравнению с их макроскопическими аналогами, что делает их идеальным материалом для применения в различных отраслях промышленности. Среди различных наноматериалов наиболее важны различные наноаллотропные модификации углерода. Способность углерода связываться с большим количеством элементов делает его одним из самых универсальных элементов в периодической таблице. Существование различных изомеров и энантиомеров, встречающихся в разнообразных структурах, является прямым следствием разнообразных связей и соответствующих им геометрий, которые может образовывать углерод. Поскольку углеродные наноструктуры обладают уникальными физическими и химическими свойствами, они широко используются в различных областях, особенно в электронной промышленности.

В тоже время непрерывный рост рынка телекоммуникаций привёл к появлению огромного количества радиочастотных систем. Чтобы обеспечить сосуществование всех этих разнообразных приборов без вредных электромагнитных помех, необходимо разработать новые экранирующие и поглощающие материалы с улучшенными характеристиками и широкой рабочей полосой частот. Композиты на основе углеродных наноструктур весьма перспективны благодаря особым проводящим свойствам, обеспечивающим высокий уровень поглощения при низкой концентрации включений.

Композитные материалы представляют собой гетерофазные системы, полученные из двух или более компонентов с сохранением индивидуальности

каждого отдельного компонента [1]. Современные композитные диэлектрические материалы обладают рядом преимуществ такими, как высокое отношение прочности к весу, способность поглощать микроволновое излучение, высокая теплопроводность и прочность на пробой [2, 3]. Изменяя объемное соотношение и конфигурацию компонентов, можно управлять свойствами композитов в соответствии с конкретными требованиями. В связи с чем композитные материалы нашли огромное применение в ряде областей науки и техники среди которых строительство, автомобильная, энергетическая и космическая промышленность, микро и наноэлектроника [4-9].

Практический интерес вызывают исследования взаимодействия поляризованного электромагнитного излучения с волокнистыми композитами в оптическом [10] и СВЧ [11, 12] диапазонах с целью создания оптоэлектронных устройств и поглощающих электромагнитное излучение покрытий. Интересной является возможность управления параметрами композитов в процессе их производства [13-15] или использования [16]. Для данной цели перспективным является использование магнитных жидкостей.

Магнитные жидкости (МЖ) представляют собой суспензию из мелких (3-15 нм) твердых магнитных однодоменных наночастиц, покрытых молекулярным слоем диспергирующего вещества и взвешенных в жидкости носителе, тепловое броуновское движение поддерживает взвешенность частиц, а молекулярные покрытия предохраняют частицы от слипания друг с другом [17]. При приложении магнитного поля в объеме магнитной жидкости образуются агломераты магнетитовых наночастиц [18], длина которых зависит от величины индукции магнитного поля [19], что позволяет рассматривать магнитную жидкость как анизотропный композит с управляемыми параметрами. Добавление в магнитную жидкость нановключений, таких как углеродные нанотрубки, позволяет увеличить степень анизотропии [10].

Помещение магнитной жидкости в жидкую матрицу приводит к образованию структур иного рода – микрокапельных агрегатов [20]. Приложение магнитного поля к такого рода композитам приводит к процессам структурообразования.

Использование в качестве матрицы полимерных материалов, позволяет создавать твердые и эластичные композиты с ориентированными включениями в форме вытянутых эллипсоидов [21] или цепочек из микрокапель [22]. Свойства таких композитов зависят от концентрации, геометрических и физических параметров, образующихся структур, которыми можно управлять, варьируя объёмную долю магнитной жидкости и величину индукции магнитного поля, при котором происходила полимеризация композита. Введением в матрицу металлических или углеродных волокон можно добиться увеличения прочности материалов, а также повлиять на их способность поглощать электромагнитное излучение [23, 24]. По этой причине оценка электрофизических характеристик волокнистых композитов приобретает особую значимость.

Контроль электрофизических параметров материалов традиционно реализуется в рамках двух подходов: контактного и бесконтактного. Среди контактных методов можно выделить зондовые, бесконтактных – оптические и СВЧ [25-27]. Достоинствами контактных методов является простота реализации эксперимента и расчета параметров, а недостатками сложность обеспечения омического контакта между зондом и исследуемым материалом. Бесконтактные методы более универсальные и точные, позволяют производить измерения веществ, имеющих в малом количестве, в т.ч. порошкообразных. Важность СВЧ-методов определения электрофизических параметров материалов также обусловлена широким развитием телекоммуникационной техники, приборов связи, измерительной аппаратуры, работающих в СВЧ-диапазоне.

Из всех СВЧ-методов измерения параметров волноводные заслуживают отдельного внимания ввиду возможности строгого математического описания поведения электромагнитной волны в волноводе. Образец помещается в волновод прямоугольного поперечного сечения, в волноводе возбуждается волна основного типа TE_{10} , конфигурация которой известна. Частотные зависимости коэффициента отражения (прохождения) электромагнитного излучения СВЧ-диапазона от образца зависят от его расположения в волноводе и параметров: толщины и комплексной диэлектрической проницаемости. Повышение точности СВЧ-

методов достигается созданием высокодобротной резонансной системы, к которой можно отнести периодические структуры с периодом, сравнимым с длиной волны. В научной литературе структуры данного типа классифицируются как СВЧ фотонные кристаллы [28, 29]. Фотонные кристаллы обладают разрешенными и запрещенными частотными зонами для распространения электромагнитного излучения. Если нарушить периодичность фотонного кристалла, внутри его запрещенной зоны возникнет дефектная мода. На частотной зависимости коэффициента отражения СВЧ-волны дефектная мода представляет собой резкий минимум. Изменение геометрических размеров и электрофизических параметров нарушения приводит к изменению положения и формы дефектной моды. Взаимодействие электромагнитного излучения СВЧ-диапазона с СВЧ фотонными кристаллами может быть описано теоретически с использованием численных методов электродинамического моделирования или матричных методов [30]. Если измеряемый образец является композитным материалом, то положение дефектной моды будет зависеть от пространственного распределения, ориентации и параметров включений. Это позволяет определять свойства включений по положению минимума коэффициента отражения СВЧ-спектра.

С прикладной точки зрения, в технике важным является возможность прогнозирования параметров материалов, содержащих включения из наноструктур, что требует разработки теоретических математических и компьютерных моделей [31-33]. Задавая пространственное расположение, ориентацию и параметры включений, открывается возможность расчета параметров композита.

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.

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 состоит в следующем:

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 подобного рода включениями.

Основные положения, выносимые на защиту:

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⁻¹м⁻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. Основные положения и результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы, докладывались и обсуждались 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».

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 14 работ, в том числе 4 статьи в журналах, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России [34-37], 10 работ в сборниках статей по докладам на конференциях [38-47].

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.

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 углеродных нанотрубок 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 теоретический расчет электрофизических параметров углеродных нанотрубок в составе композитного материала и произведен обзор существующих методов измерений.

Во втором разделе описаны результаты экспериментальных исследований, демонстрирующие возможность использования магнитного поля для управления прохождением электромагнитного излучения с различными длинами волн через композиты на основе магнитной жидкости. В оптическом диапазоне продемонстрирована возможность модуляции мощности линейно поляризованного

лазерного излучения с различными длинами волн, прошедшего сквозь магнитную жидкость с многослойными углеродными нанотрубками, путем варьирования вектора индукции магнитного поля. Выявлено, что увеличение длины волны оптического излучения и величины индукции магнитного поля приводит к увеличению значения глубины модуляции поляризованного оптического излучения до 15%. Добавление УНТ приводит к росту (примерно в полтора раза) глубины модуляции. В сверхвысокочастотной области использование магнитных жидкостей открывает возможность управления частотными характеристиками СВЧ-излучения. В качестве структуры для управления была выбрана периодическая структура – одномерный СВЧ фотонный кристалл, в качестве нарушения периодичности в центральном слое располагался композит ЭС/МЖ. Обнаружен немонотонный характер влияния магнитного поля. Увеличение индукции подавляет дефектную моду до экстремального значения, а последующий рост поля приводит к её восстановлению. Исследовано влияние объемной доли магнитной жидкости в композите на управляемость характеристиками фотонной структуры.

В третьем разделе приведены результаты экспериментальных исследований электрофизических параметров композитов ЭС/МЖ/УНТ в сверхвысокочастотной области. Выявлено, что в объеме композита в процессе полимеризации в магнитном поле образуются нитевидные структуры из магнитных наночастиц и УНТ. Определение параметров производилось по смещению дефектной моды СВЧ фотонного кристалла с нарушением в виде исследуемого композита. Выявлено, каким образом величина и направление индукции магнитного поля, в котором происходила полимеризация композита, влияет на частотные характеристики фотонного кристалла. Также подробно исследуется влияние концентрации УНТ и магнитных наночастиц в полимерной матрице. Выявлено, что нитевидные структуры проявляют анизотропию электрофизических свойств. Степень анизотропии электрофизических параметров определялась в ходе численного моделирования в специализированных программных пакетах.

В четвертом разделе была предложена физическая модель, позволяющая свести участок волновода, заполненный диэлектриком с ориентированными проводящими нитями, к многослойной структуре. Для расчета спектра коэффициента отражения СВЧ-излучения был применен метод матриц передачи. Учет наличия нитей производился с применением математического аппарата теории возмущений. Показано, что результаты расчетов с использованием разработанной модели практически полностью совпадают с расчетами в программах электродинамического 3D-моделирования, погрешность не превышает 1%, если объемная доля включений мала или их диэлектрические свойства близки к параметрам матрицы, а время расчета по сравнению с возможностями существующих программных пакетов сокращается на порядок, при толщине нитей менее 15 мкм. Исследована применимость модели при различных концентрациях и параметрах нитевидных включений. Показана возможность применимости разработанной модели для анализа характеристик композитных материалов с неоднородным заполнением ориентированными нитями. С помощью предложенной модели успешно рассчитаны параметры нитей на основе эмпирических данных, изложенных в третьей главе. Расчетные значения подтверждаются результатами электродинамического 3D-моделирования.

В заключении обобщены ключевые результаты и сформированы итоговые выводы проведенного исследования.

1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ КОМПОЗИТОВ С УПРАВЛЯЕМЫМИ ПАРАМЕТРАМИ, СОДЕРЖАЩИХ УГЛЕРОДНЫЕ НАНОТРУБКИ И МАГНИТНУЮ ЖИДКОСТЬ

1.1 Современное состояние исследований композитных материалов, содержащих УНТ

Углеродные нанотрубки (УНТ) обнаружил Имиджима в 1991 году как побочные продукты синтеза фуллеренов [48]. Углеродные нанотрубки представляют собой одну из аллотропических форм углерода. Расположение атомов в идеальной однослойной структуре можно представить, если вырезать из графитового слоя бесконечную ленту в определенном направлении L и свернуть эту ленту в цилиндр. В зависимости от направления L получаются нанотрубки разных типов и свойств [49]. По количеству слоев выделяют многостенные (МУНТ) и одностенные (ОУНТ) углеродные нанотрубки.

Диаметр УНТ составляет от десятых до нескольких десятков нанометров, а длина от микрометра до нескольких сантиметров [50]. Сопротивление различных УНТ составляет от сотен Ом до сотен МОм при комнатной температуре. Электропроводность углеродных нанотрубок зависит от нескольких факторов: тип УНТ (однослойные или многослойные), плотность имеющихся дефектов, наличие (или отсутствие) адсорбированных молекул, и один из ключевых факторов – хиральность. Нанотрубки являются хиральными, если обладают винтовой осью симметрии. Те нанотрубки, для которых сопротивление незначительно увеличивается по линейному закону с уменьшением температуры, можно рассматривать как вещество с нулевой шириной запрещенной зоны или как металл. К полупроводниковому типу можно отнести УНТ для которых наблюдается линейная зависимость логарифма от обратной температуры [51]. Следует отметить, что УНТ обладают более высокой проводимостью в продольном направлении, чем в поперечном направлении. Анизотропия сопротивления пленки ориентированных УНТ R_{perp}/R_{par} близка к 8ми [52], но обусловлена тем, что удельное

сопротивление определяется скорее точками контакта между отдельными УНТ, так что за перенос отвечает прыжковый механизм.

Углеродные нанотрубки обладают огромным потенциалом для практического применения в области электроники [53], химии и биомедицины [54]. Интерес представляют механические свойства – несмотря на малый вес УНТ имеют высокую жесткость и прочность, термические свойства – УНТ отличаются высокой теплопроводностью, химические свойства – УНТ химически инертны, что позволяет использовать их в коррозионностойких покрытиях, электрические свойства – в зависимости от структуры УНТ могут быть металлами или полупроводниками [55]. Такое разнообразие свойств делает перспективным использование УНТ в современных композитных материалах, в том числе полимерных [56].

На сегодняшний день существует широкий спектр методов внедрения УНТ в полимерную матрицу. Повлиять на свойства полимерных композитов с УНТ возможно в процессе изготовления, диспергирования и ориентации УНТ, выбора хиральности и длины УНТ, а также материала матрицы. Рассмотрим основные способы изготовления композитов с УНТ [56]:

- Смешивание расплава – это промышленно удобный процесс производства нанокомпозитов на основе термопластов. Как правило, этот метод включает смешивание полимерных матриц с УНТ, которые затем подвергаются сдвиговым усилиям при повышенных температурах с использованием смесителя Банбери или экструдера, что способствует разрушению и диспергированию пучков УНТ в полимерной матрице. Эффективность смешивания нанотрубок возрастает при увеличении температуры среды. Этот метод быстрый, недорогой и подходит для нерастворимых полимеров.
- Смешивание раствора – является наиболее распространенным методом формирования полимерных нанокомпозитов на основе УНТ. Этот метод включает интенсивное перемешивание (механическое/магнитное, энергичное встряхивание, гомогенизацию с высоким сдвиговым усилием) УНТ в

растворителе с целью облегчения разделения нанотрубок и их диспергирования внутри матрицы полимера.

- Обработка ультразвуком широко используется для диспергирования УНТ в растворах, для функционализации УНТ и для разработки нанокомпозитов и наноматериалов. Углеродные нанотрубки диспергируются в растворителе с помощью ультразвука перед добавлением в полимерную матрицу, такую как эпоксидная смола. Если одним из составляющих композита является магнитная жидкость, тогда УНТ можно подвергать воздействию ультразвука непосредственно в магнитной жидкости [57].

В зависимости от материала, в котором диспергируются УНТ, можно выделить композиты с металлической матрицей MMCs, жидкокристаллические эластомеры, полимерные композиты [58], в частности на основе эпоксидных смол [59].

В металлических композитах MMCs углеродные нанотрубки используются в основном для улучшения механических свойств. В [60] МУНТ с концентрацией в диапазоне 0.2...3.0 об.% использовались для армирования матрицы из алюминия. Установлено, что введение МУНТ в концентрации до 0.6 об.% обеспечивает рост предела прочности на растяжение до экстремального значения 165 Мпа. Однако свыше 0.6 об.% наблюдалась сильная агломерация МУНТ, что служило снижению значения предельной прочности на растяжение. Таким образом, причиной улучшения свойств композита является более строгое и однородное распределение УНТ в матрице.

Наноматериалы на основе углерода, такие как углеродные нанотрубки, оксид графена, графеновые хлопья, графеновые и углеродные точки, проявляют синергетическое взаимодействие с жидким кристаллом, обеспечивая интересные свойства, такие как низкое пороговое напряжение переключения, более быстрый отклик переключения, сниженная ионная проводимость и образование локализованных псевдонематических доменов [61].

В качестве матриц для создания высокопрочных композитов на основе УНТ применяются такие полимеры, как эпоксидные смолы, полиамиды, термопласты на

основе стирола и их аналоги. Благодаря повышенной прочности, жесткости и стойкости к коррозионному воздействию, данные материалы находят широкое применение в автомобилестроении и аэрокосмическом секторе [5]. Углеродные нанотрубки высокоэффективны в повышении теплопроводности гибридных полимерных композитов благодаря синергетическому поведению с другими наполнителями путем образования сетей в виде 3D-мостиков, что облегчает передачу фононов [62].

В полимерных композитах наряду с улучшением механических и термических свойств, изменяются электрофизические [23, 58, 63, 64] параметры. В [63] было показано, что добавление 1 мас.% УНТ в эпоксидную матрицу увеличивает модуль Юнга на 100%, а предел прочности на 200% по сравнению с чистой матрицей, увеличение электропроводности на девять порядков наблюдалось в диапазоне 0–4 мас.% УНТ в результате явления перколяции [65]. Критический порог был оценен в диапазоне от 0.5 до 1 мас.% УНТ. Результаты этого исследования показывают, что было бы бесполезно использовать высокие концентрации УНТ для улучшения механических свойств композитов, если они находятся в случайном распределении. В [64] наблюдалось различие электропроводности композита в ортогональных направлениях на три порядка. Исследование электропроводности образцов выполнялось на постоянном токе.

Высокая величина электропроводности делает перспективным использование УНТ в составе радиопоглощающих композитов [4, 66-72], призванных решить проблему электромагнитного загрязнения, которое может угрожать информационной безопасности в жизненно важных областях и нормальной работе высокочувствительных электронных устройств. Композиты с ориентированными УНТ обладают анизотропией электрофизических свойств [73], что открывает возможность использования их в поляризационных устройствах.

Интересным является способность УНТ изменять ширину запрещенной зоны композитов, что может быть использовано в «зеленой энергетике». Наиболее экономичным методом производства водорода остается фотокатализ. Ширина запрещенной зоны материала выступает одним из ключевых параметров,

определяющих его фотокаталитическую активность. Уменьшение ширины запрещенной зоны отвечает за улучшение производства водорода. В работе [74] ширина запрещенной зоны композита $\text{TiO}_2/\text{УНТ}$ была уменьшена с 3.11 эВ до 3.09 эВ.

Сверхбольшие интегральные схемы требуют высокой производительности и низкого энергопотребления. Традиционные медные межсоединения на кристалле достигают своего физического ограничения по сопротивлению и надежности и могут больше не поспевать за пропускной способностью данных процессора. В качестве одной из потенциальных альтернатив для соединений элементов нанoeлектроники на кристалле предлагается использовать композиты медь/УНТ [6].

Суспендированные МУНТ проявляют ограничивающие свойства, то есть служат оптическим ограничителем [53]. Оптическое ограничение является важным нелинейным явлением, которое может быть использовано для защиты тонких оптических устройств, включая человеческий глаз, от высокоинтенсивного лазерного излучения.

Таким образом, добавлением УНТ можно в широких пределах управлять свойствами композитных материалов, что может найти применение во многих областях науки и техники, в т.ч. электронике и нанoeлектронике. Более сильного улучшения свойств композита можно достичь, реализуя более строгое и однородное распределение УНТ в матрице.

1.2 Взаимодействие СВЧ-излучения с композитами, содержащими углеродные нанотрубки

Гибридные полимерные композиты нашли применение в области электромагнитной совместимости, так в [7] рассматриваются принципы и теория электромагнитного экранирования, представлены различные подходы к проектированию композитов. Перспективными при создании покрытий, поглощающих микроволновое электромагнитное излучение, являются композиты

на основе УНТ [68, 75, 76]. Поглощение микроволн композитами на основе УНТ [66, 67] значительно лучше (рис. 1.1) по сравнению с чистыми УНТ, что можно объяснить формированием в композитах множества путей, на которых происходит потеря мощности электромагнитного излучения и синергетическим эффектом между всеми компонентами.

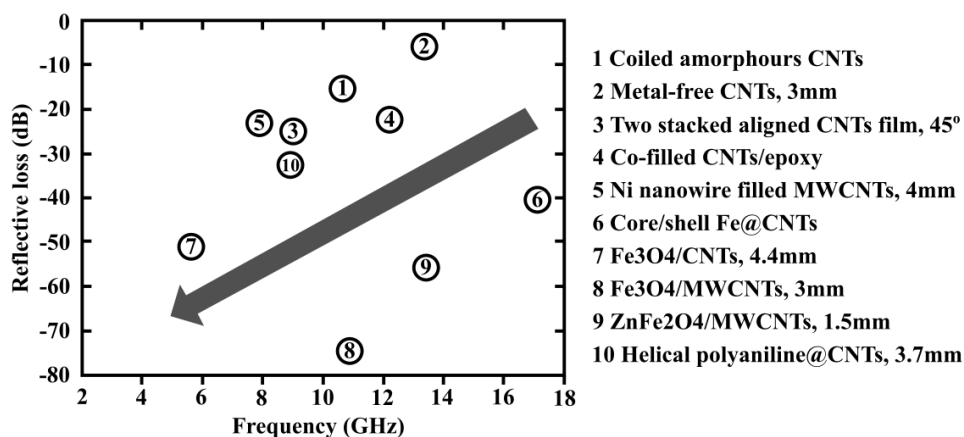


Рисунок 1.1 – Сравнительная диаграмма потерь на отражение некоторых композитов на основе УНТ. [66]

В [73] сравнивались электромагнитные свойства композитов с матрицей из эпоксидной смолы, содержащие УНТ от двух разных поставщиков: УНТ-В (диаметр 13-16 нм, длина >1 мкм, плотность 120-170 кг/м³) и УНТ-К (диаметр 10-15 нм, длина 10-20 мкм, плотность 50-100 кг/м³). Композиты на основе УНТ-В вели себя как широкополосные радиопоглощающие материалы с лучшими показателями затухания выше 12.4 ГГц. Композиты на основе УНТ-К показывали хорошие результаты затухания в X-диапазоне (>99%). Выявлено, что большая длина УНТ-К способствовала взаимосвязи между нитями, а также образованию компактных агломератов, окруженных богатыми смолой областями, что способствовало согласованию импеданса и механизмам потерь в радиопоглощающих материалах. Корреляция данных показала сложность теоретического расчета электрофизических параметров радиопоглощающих материалов, поскольку механизмы потерь, связанные с затуханием волн, могут зависеть от конкретных характеристик УНТ, однородности композитов, толщины образца, а также межфазных границ между компонентами в композите.

В [72] композиты МУНТ/ЭС были изготовлены с использованием новой технологии дисперсионного и компрессионного формования, которая позволила равномерно распределить большие массовые доли УНТ (до 20.4 мас.%). Было достигнуто значение электропроводности композита 9 См/см, что привело к эффективности экранирования электромагнитного излучения -19 дБ для пленки толщиной 0.35 мм и -60 дБ для композитов толщиной 1.75 мм в X-диапазоне (8.2–12.4 ГГц).

Существует множество способов, позволяющих управлять параметрами композита с УНТ в процессе его изготовления. В частности, в качестве внешних физических факторов активно применяются ультразвук, УФ-излучение, электрические и магнитные поля. [77-79].

Электропроводность УНТ в сильной мере определяется состоянием их поверхности. При обработке кислотной смесью спиральных углеродных нанотрубок на их поверхности образуются функциональные группы и дефекты [80]. Наблюдалось увеличение поглощательной способности (минимальные потери на отражение составляют -45.4 дБ при 17.5 ГГц при толщине 2.4 мм), что можно объяснить образующимися центрами поляризации. Релаксация от функциональных групп и дефектов синергетически увеличивают способность диэлектрических потерь. В [13] исследовался композит ЭС/УНТ, в котором нанотрубки предварительно подвергались воздействию УФ излучения. Наблюдалась немонотонная зависимость удельной электропроводности композита от длительности воздействия УФ излучения, что может быть связано с конкурирующими процессами фотодесорбции молекул кислорода с молекулами УНТ и адсорбции молекул озона. В [14] при температуре отжига 450 °С удалось повысить электропроводность композита в 5 раз.

Зависимость комплексной диэлектрической проницаемости от объемной доли МУНТ и графита на СВЧ измерялась в [81] (рис. 1.2). С увеличением концентрации наполнителя наблюдается монотонное возрастание действительной и мнимой составляющих комплексной диэлектрической проницаемости композита. Мнимая часть диэлектрической проницаемости образцов с графитом

выше, чем с УНТ, что обусловлено более высокой электропроводностью неупорядоченных графитовых структур, по сравнению с неориентированными пучками УНТ.

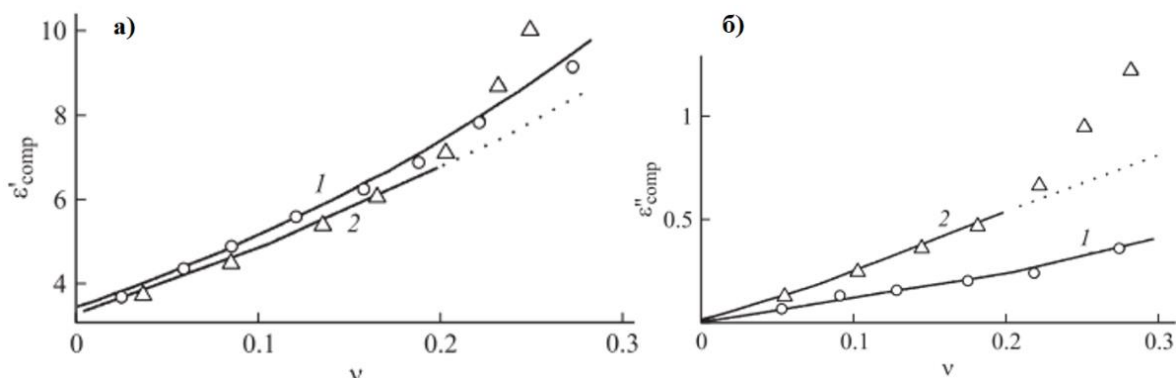


Рисунок 1.2 – Экспериментальные (точки) и теоретические (сплошные линии) зависимости действительной (а) и мнимой (б) составляющих комплексной диэлектрической проницаемости композиционного материала от объемного содержания проводящих фаз: 1 – углеродные нанотрубки; 2 – частицы мелкодисперсного графита. [81]

В представленных работах рассматриваются изотропные композиты, в которых отсутствуют эффекты, связанные с поляризационными характеристиками взаимодействующего с ними электромагнитного излучения. При рассмотрении взаимодействия поляризованного электромагнитного излучения практический интерес вызывает изготовление композитов с ориентированными структурами.

В [82] в качестве строительных блоков для поглотителей микроволн использовались листы ориентированных УНТ. Частота минимума на спектре коэффициента отражения СВЧ-излучения контролировалась путем укладки их с различными углами пересечения. В [69] для управления параметрами аэрогеля использовалась направленная сублимационная сушка, получались материалы с ориентированными микроканальными структурами. Ориентированная структура пор вызывает множественные отражения и рассеивание падающих электромагнитных волн внутри материала, что способствует затуханию энергии электромагнитного излучения.

Стеклопредметное стекло с покрытием ИТО (оксид индия и олова) погружалось вертикально в суспензию УНТ/вода при комнатной температуре [83]. При постепенном испарении воды в течение нескольких дней было обнаружено,

что нанотрубки собираются и ориентируются на поверхности стекла вдоль тройной линии воздух/жидкость/субстрат. Текстуры двойного лучепреломления показали макроскопическое однородное планарное выравнивание УНТ. В работе рассматриваются оптические свойства, но не исследуются диэлектрическая проницаемость и проводимость полученных пленок.

В [84] для выравнивания ОУНТ с массовой долей 0.5% в полимерной матрице использовалось магнитное поле с индукцией 2 Тл и несколько напряженностей электрического поля (150, 300, 450 и 600 В/см). Было выдвинуто предположение, что включение одновременно электрического и магнитного поля в одном направлении может создать максимальную степень выравнивания вследствие крутящего момента, кулоновских и электрофоретических сил. К недостаткам данного метода можно отнести большие значения электрического и магнитного полей, что затрудняет управление параметрами композита в процессе его использования.

В [85] показана возможность использования процесса электропрядения для изготовления композитных нановолокон и мембран, армированных ОУНТ. Композитные мембраны показали значительное улучшение механических свойств по сравнению с мембраной из чистого полимера. Исследование роли сдвиговой силы на выравнивание нанотрубок изучалось в [24]. В [86] было создано течение Пуазейля, путем пропускания суспензии ОУНТ/винилового эфира через микро- и наноканалы. Однако имеется проблема, связанная с тем, что структуры получаются неоднородными, что снижает степень анизотропии электрофизических параметров композита.

Углеродные нанотрубки обычно сильно агрегируют и запутываются в других матрицах из-за сил Ван-дер-Ваальса между ними, что ослабляет способность композитных поглотителей согласовывать импеданс. Для улучшения согласования импеданса и интенсивности поглощения перспективным является сочетание УНТ с магнитными материалами [71]. Композиты на основе эпоксидной смолы с УНТ, заполненными наночастицами Fe, обладают более высокими диэлектрическими и магнитными потерями [87].

В [88, 89] изучались свойства поглощения микроволн магнитно-модифицированными МУНТ с различным выравниванием по отношению к электрическому полю падающей СВЧ-волны. МУНТ были декорированы магнитными наночастицами с использованием «мокрого» химического метода, полученные модифицированные МУНТ (м-МУНТ) использовались в качестве наполнителя в композите ЭС/м-МУНТ при различных соотношениях массы углеродных нанотрубок к эпоксидной смоле. Магнитные м-МУНТ были подвергнуты воздействию магнитного поля 0.4 Тл в определенном направлении для достижения требуемого выравнивания углеродных нанотрубок в эпоксидной смоле.

В [88] исследовалась характеристика поглощения микроволн (X-диапазона). При выравнивании структур м-МУНТ параллельно падающему вектору \mathbf{E} , наблюдалось повышенное поглощение. Образцы с перпендикулярным выравниванием имели самое низкое поглощение. В [89] максимальное отношение эффективной электропроводности при параллельной и перпендикулярной ориентации структур составила $\sigma_{\parallel}/\sigma_{\perp} = 4$ при массовой доле м-МУНТ порядка 1%. В обеих работах не была исследована возможность управления параметрами композита в результате варьирования величины индукции магнитного поля.

Представленные работы обладают важными практическими результатами, но в них либо представлены только частотные характеристики электромагнитного излучения, взаимодействующего с композитом, либо определены эффективные параметры композита, но не были найдены параметры включений из УНТ и не представлена теоретическая модель, позволяющая прогнозировать параметры композита в процессе производства.

Таким образом, композиты с УНТ перспективны при создании радиопоглощающих покрытий и элементов СВЧ-техники, при этом параметры композитов зависят не только от объемной доли УНТ, но и от способа их функционализации, диспергирования и ориентирования в матрице. Композиционные материалы с ориентированными УНТ характеризуются выраженной анизотропией оптических и электрических свойств.

1.3 Использование магнитных жидкостей для управления параметрами композитов.

В [15] исследовались микроволновые параметры композитов, наполненных порошком железа, полученным методом механического измельчения. Установлено, что геометрическая форма частиц порошкового наполнителя оказывает существенное влияние на эффективные электрофизические параметры композита. Интересным с практической точки зрения для управления параметрами композитов в процессе изготовления и использования является применение магнитных жидкостей [90]. Магнитная жидкость является устойчивой коллоидной суспензией однодоменных магнитных наночастиц в жидкости-носителе [17]. Магнитные жидкости примечательны тем, что изменяют свои электрофизические [91] и оптические свойства [92] в присутствии магнитного поля. Появление особенностей взаимодействия электромагнитного излучения в различных частотных диапазонах является следствием образования вытянутых агломератов из магнитных частиц, которые удалось наблюдать в оптический микроскоп в работах [19, 93] и сканирующий электронный микроскоп [94].

В [19] была исследована динамика образования агломератов. Из рис. 1.3 видно, что при некотором пороговом значении магнитного поля, которое по-видимому зависит от параметров магнитной жидкости, происходит резкое увеличение длины агломератов, связанное с объединением нескольких коротких агломератов.

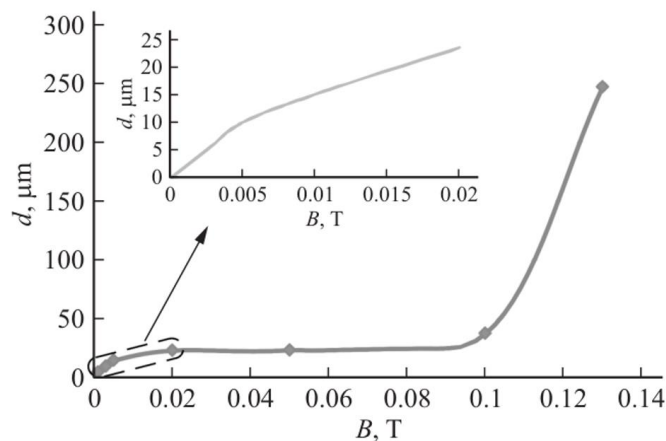


Рисунок 1.3 – Влияние индукции магнитного поля на продольные размеры агломератов в тонком слое МЖ. [19]

Распространение электромагнитного излучения в объеме такой дисперсной системы сопровождается его взаимодействием с образовавшимися агломератами. Электрическая компонента излучения при параллельной с агломератами ориентации эффективно ими поглощается, а при перпендикулярной поглощение мало [95, 96].

Влияние внешнего магнитного поля на прохождение поляризованного оптического излучения через магнитные жидкости с различным объемным содержанием твердой фазы подробно рассмотрено авторами работы [97]. В условиях наложения магнитного поля наблюдается снижение коэффициента пропускания образца вплоть до достижения минимального значения. Спустя определенный временной интервал после достижения минимума регистрируется повторное увеличение интенсивности с последующим выходом на насыщение. Пропускание уменьшается вследствие образования агломератов магнитной жидкости, которые эффективно поглощают и рассеивают оптическое излучение. Увеличение длины агломератов со временем приводит к расширению промежутков между ними и, как следствие, к росту пропускания света. Рост пропускания поляризованного излучения начинается на 3-й минуте, а насыщение наступает через 10 минут. Аналогичные стадии выделяются и в композите магнитная жидкость – углеродные нанотрубки (МЖ/УНТ) [10]. Поляризационный эффект возрастает с увеличением концентрации УНТ и индукции магнитного поля.

В оптическом диапазоне в условиях слабых внешних магнитных полей спектральная зависимость дихроизма характеризуется наличием экстремумов. Максимум достигается в интервале 470–480 нм, а минимум в интервале 740–750 нм [98]. С ростом напряженности приложенного магнитного поля более 10 кА/м характер спектральной зависимости дихроизма претерпевает значительные изменения. Наблюдается значительное увеличение параметра дихроизма во всем видимом и ближнем инфракрасном (ИК) диапазонах [92].

Таким образом, при приложении к слою магнитной жидкости магнитного поля магнитную жидкость можно рассматривать как композит, содержащий нитевидные включения из магнитных наночастиц – агломераты, параметрами

которого можно управлять, изменяя величину и направление вектора индукции магнитного поля. Данную особенность можно использовать в различных оптических устройствах [99]. В [100] измерялась глубина модуляции лазерного излучения с длиной волны 650 нм, однако не исследовалась зависимость глубины модуляции от длины волны, хотя в [92, 101-103] указывается, что коэффициент пропускания оптического излучения возрастает с увеличением длины волны лазерного излучения.

В [101] не исследовалось влияние магнитного поля, а в [102] магнитное поле ориентировалось только вдоль направления распространения оптического луча. В [103] исследовалось пропускание через магнитную жидкость (средний диаметр частиц 68 нм, объемная доля твердой фазы 0.7%) в магнитном поле с различными значениями индукции поляризованного оптического излучения с длинами волн от 600 до 900 нм. Максимальный линейный дихроизм наблюдался при длине волны 600 нм и возрастал с увеличением магнитного поля. Разница пропускания, зависящая от поляризации, составила 40% для параллельной и 20% для перпендикулярной поляризации относительно вектора индукции магнитного поля. Однако не исследовались оптические свойства при меньших длинах волн. В представленных работах не исследовалось изменение оптических свойств при добавлении УНТ.

Тем временем управление параметрами композита можно осуществить, если в магнитную жидкость диспергировать УНТ [104]. Расчеты межчастичного взаимодействия (энергии Ван-дер-Ваальса, стерической и магнитной энергии) показали, что покрытые поверхностно-активным веществом магнитные наночастицы кинетически стабильны в жидкости, в то время как МУНТ образуют цепочечные агрегаты. Экспериментальные и теоретические исследования подтверждают объемное выравнивание изогнутых МУНТ в феррожидкостной системе [105], которое можно настраивать с использованием приложенного магнитного поля (рис. 1.4).

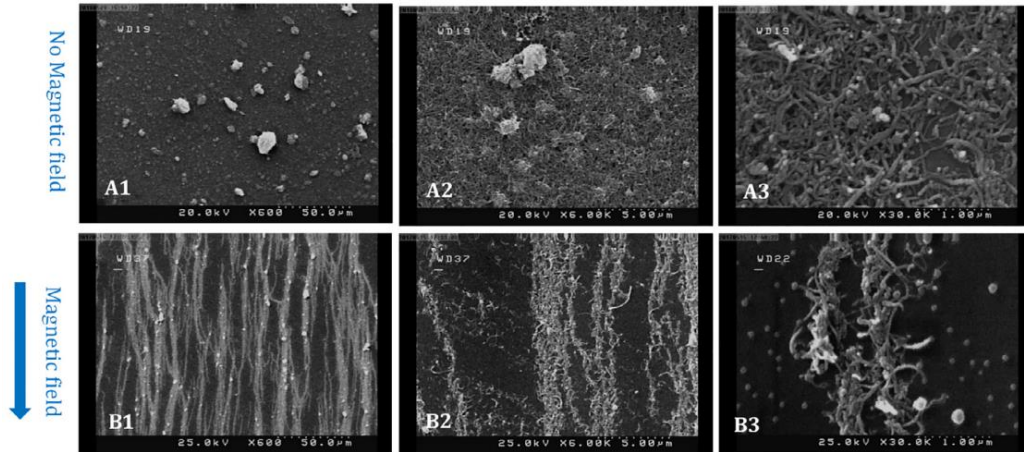


Рисунок 1.4 – Изображения структур $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{МУНТ}$, полученные с использованием сканирующего электронного микроскопа с полевой эмиссией при различных увеличениях, А1-3 в отсутствие магнитного поля, В1-3- при воздействии магнитного поля (нитевидные структуры). [105]

Эффект пространственного упорядочения УНТ экспериментально обоснован также в исследованиях [10, 100]. Авторы продемонстрировали, что увеличение концентрации УНТ и напряженности внешнего магнитного поля приводит к двукратному увеличению поляризационных эффектов.

В [106] исследовались спектры коэффициента отражения электромагнитного излучения в широком диапазоне частот от слоев магнитной жидкости с МУНТ различной толщины при различных ориентациях магнитного поля относительно силовых линий электромагнитного поля. Была продемонстрирована возможность перестройки экранирующего устройства на другую частоту изменением толщины покрытия. Однако не исследовалось влияние объемной доли УНТ и величины индукции магнитного поля на свойства композита. Использование жидкостей в качестве экранирующих покрытий может встретить практические трудности в связи с необходимостью удерживать жидкость в пространстве вокруг экранируемого объекта.

Добавление магнитной жидкости в несмешиваемую с ней матрицу, например, масло АМГ-10, приводит к образованию микрокапельных агрегатов [21]. Магнитная эмульсия представляет собой систему микрокапель магнитной жидкости, взвешенных в жидкой среде (рис. 1.5, а). По величине межфазного натяжения на границе капли магнитной жидкости с дисперсионной средой

магнитные эмульсии подразделяют на два типа. К первому типу относят магнитные эмульсии на основе минеральных масел, в них капли магнитной жидкости деформируются даже в малых магнитных полях [21, 107]. К другому типу относятся магнитные эмульсии на водной основе, в которых межфазное натяжение велико, а при приложении магнитного поля изменение формы микрокапель мало. При этом капли магнитной жидкости образуют в направлении магнитного поля цепочечные агрегаты (рис. 1.5, б). В более сильных магнитных полях получается столбчатая сплошная структура (рис. 1.5, в, г).

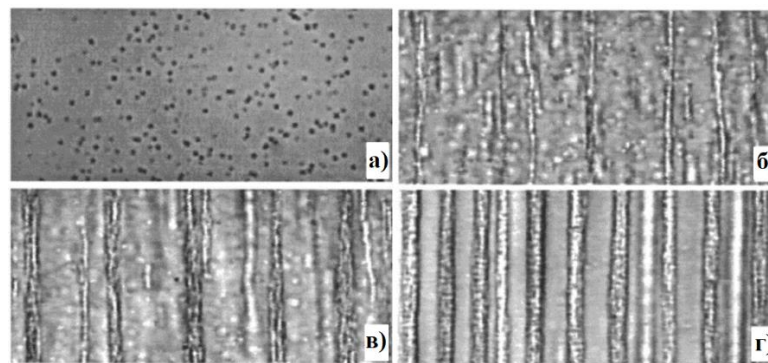


Рисунок 1.5 – Изображения, полученные с оптического микроскопа, демонстрирующие структуры микрокапельных агрегатов при различных значениях индукции магнитного поля: а) капельная структура при 15 Гс, б) сосуществование капель и цепей при 30 Гс, в) сосуществование капель, цепей и столбцов при 42 Гс, г) столбчатая структура при 60 Гс. Горизонтальная ширина изображений составляет 40 мкм. [108]

Данного рода композиты могут найти применение в качестве управляемых композитов в СВЧ-диапазоне [109]. В работе [110] обоснована применимость полимерных материалов в качестве матрицы при создании композитов, содержащих магнитные жидкости. Была доказана возможность получения нанокомпозитов с магнитно-контролируемыми механическими свойствами. Однако не исследовались электрофизические параметры полученных материалов.

Таким образом, приложение магнитного поля к магнитной жидкости приводит к образованию в ней агломератов из магнитных наночастиц, что приводит к изменению оптических свойств, например, явлению дихроизма. Добавление в магнитную жидкость УНТ позволяет увеличить анизотропию оптических свойств и более эффективно управлять мощностью поляризованного

оптического излучения с различными длинами волн, проходящего сквозь тонкий слой композита МЖ/УНТ. При полимеризации в магнитном поле трехкомпонентной суспензии эпоксидная смола/магнитная жидкость/углеродные нанотрубки (ЭС/МЖ/УНТ), можно получить композит с проводящими структурами, форма и ориентация которых определяется величиной и направлением вектора индукции магнитного поля. Управление параметрами композита можно осуществлять в процессе изготовления, изменяя объемную долю УНТ и МЖ, величину и направление вектора индукции магнитного поля. Более того, в СВЧ-области магнитная восприимчивость магнитной жидкости при приложении магнитного поля изменяется в широких пределах, что связано с возникновением ферромагнитного резонанса [111]. Это открывает возможность управления параметрами композитами, содержащих магнитные жидкости, после изготовления в процессе эксплуатации.

1.4 Теоретические модели, описывающие электрофизические параметры композитов с углеродными нанотрубками.

Моделирование наноматериалов с использованием электронно-вычислительных машин является основным инструментом их изучения, т.к. реальные эксперименты дорогостоящие и связаны с рядом технических трудностей при их реализации.

Согласно результатам квантово-химического моделирования, в рамках теории функционала плотности (DFT) установлено, что полимерный материал поливинилпирролидон (ПВП) взаимодействует с нанотрубками за счет сочетания ван-дер-ваальсовых и кулоновских сил, вызванных перестройкой электронной структуры при комплексообразовании. Моделирование нанокомпозитов «ПВП+УНТ» показало изменение электронно-энергетического строения комплексов, которое обеспечивает появление у композиционного материала полупроводящих свойств. [32]

Известно, что при описании диэлектрических свойств композитов с проводящими наполнителями одним из подходов является применение перколяционных моделей [112]. Порог перколяции в композите с полимерной матрицей представляет собой минимальное содержание наполнителя, которое не допускает изменений в электропроводности композита. Таким образом, когда концентрация наполнителя превышает порог перколяции, проводимость увеличивается. Введение УНТ в полимерную матрицу снижает порог перколяции из-за большого соотношения сторон и собственной проводимости УНТ. Нанотрубки в полимере распределяются в виде сетевой структуры, создающей проводящие пути, в которых УНТ находятся в тесном контакте друг с другом, тем самым облегчая проводимость электронов через механизмы «прыжков» или «туннелирования» [113].

Ниже точки перколяции предлагается описывать концентрационную зависимость диэлектрической проницаемости композита и электропроводности на постоянном токе следующей формулой [114], которая справедлива для бинарных систем со случайным распределением наполнителя:

$$\begin{aligned} \varepsilon &\sim \varepsilon_m |\varphi - \varphi_c|^{-q}, \varphi < \varphi_c, \\ \sigma &\sim \sigma_m |\varphi - \varphi_c|^{-q}, \varphi < \varphi_c, \end{aligned} \quad (1.1)$$

где ε_m , σ_m – диэлектрическая проницаемость и электропроводность полимерной матрицы, q – критический показатель, φ_c – порог перколяции в системе. Значение показателя q зависит от взаимодействия матрицы и наполнителя [115]. Трехмерному распределению наполнителя соответствует значение индекса $q = 1.6 \div 2$, а двумерному $q = 1 \div 1.3$. Более высокие значения параметра q для композитов с УНТ указывают, что проводимость может осуществляться в результате процесса туннелирования [116] при отсутствии контакта между частицами.

Для композитов с малыми объемными долями f случайно ориентированных УНТ средней длины L и диаметра d аналитическая оценка эффективной электропроводности σ_e композитов может быть дана в следующем виде [117]:

$$\frac{\sigma_e}{\sigma_m} = 1 + \frac{f}{3} \left[\frac{1}{(\sigma_3/\sigma_m - 1)^{-1} + H} + \frac{2}{(\sigma_1/\sigma_m - 1)^{-1} + (1-H)/2} \right], \quad (1.2)$$

где σ_3 и σ_1 – продольная и поперечная проводимости УНТ, σ_m – проводимость матрицы. Параметр H отражает влияние соотношения сторон УНТ $p = L/d$ в следующем виде:

$$H(p) = \frac{1}{p^2 - 1} \left[\frac{p}{\sqrt{p^2 - 1}} \ln(p + \sqrt{p^2 - 1}) - 1 \right]. \quad (1.3)$$

В работе [118] разработана аналитическая модель эффективной электропроводности композитов, содержащих УНТ, которая учитывает не только концентрацию УНТ и эффект перколяции, но также анизотропию проводимости УНТ, соотношение сторон и непрямолинейность УНТ. Обнаружено, что непрямолинейность имеет особенно важное влияние. Согласно данной модели эффективная диэлектрическая проницаемость задается формулой:

$$\frac{\sigma_e}{\sigma_m} = 1 + \frac{\eta f / 3}{\sigma_m / \eta \sigma_3 + H}, \quad (1.4)$$

$$\eta = L^{ce} / L,$$

где L – длина отдельной УНТ, L^{ce} – эквивалентная (прямолинейная) длина отдельной УНТ, η – коэффициент прямолинейности УНТ, $\eta \sigma_3$ и ηf номинальная электропроводность и объемная доля эквивалентного прямого электрического кабеля, соответственно.

Для объемных долей f , больших перколяционного порога $f_{CVF}(H)$, следует учесть эффект перколяции. Известно, что при $f > f_{CVF}$ УНТ электрически связаны, образуя проводящую сеть, даже если они все еще не будут физически контактировать друг с другом. Поэтому можно предположить, что после полной перколяции УНТ будут иметь очень длинные проводящие пути (с реальной длиной L^p и эквивалентной длиной L^{pe}) с эквивалентной проводимостью $\hat{\eta} \sigma_3$. Параметр $\hat{\eta}$ содержит эффекты непрямолинейности, а также контактного сопротивления электрически соединенных дорожек УНТ. Далее, предполагая, что эти эквивалентные УНТ имеют случайно ориентированное распределение и принимая приближение, что эквивалентное соотношение сторон должно быть бесконечным, из уравнения (1.2) получаем формулу:

$$\frac{\sigma_e}{\sigma_m} = 1 + \frac{\hat{\eta}^2 f}{3} \left(\frac{\sigma_3}{\sigma_m} \right). \quad (1.5)$$

Модель применима в частных случаях с анизотропным распределением УНТ в композитах. Например, электропроводность композитов с УНТ, выровненными продольно и поперечно, можно оценить, соответственно, при $f < f_{CVF}$:

$$\frac{\sigma_3^e}{\sigma_m} = 1 + \frac{\eta f}{\sigma_m / \eta \sigma_3 + H(\eta p)}, \quad (1.6a)$$

$$\frac{\sigma_1^e}{\sigma_m} = 1 + \frac{\eta f}{(\sigma_1 / \sigma_m - 1)^{-1} + [1 - H(\eta p)] / 2}, \quad (1.6b)$$

и при $f > f_{CVF}$:

$$\frac{\sigma_3^e}{\sigma_m} = 1 + \frac{\hat{\eta}^2 \sigma_3}{\sigma_m} f, \quad (1.6в)$$

$$\frac{\sigma_1^e}{\sigma_m} = 1 + 2\hat{\eta} f, \quad (1.6г)$$

Таким образом, видно, что электропроводность в случае ориентированных УНТ (1.6в) примерно в три раза больше, чем при случайном распределении (1.5). Однако в работе не было отмечено, что следует учитывать снижение порога перколяции в случае выровненных УНТ [119].

В [120] изучается влияние УНТ на анизотропию электропроводности полимерных композитов. Разработана модель сети перколяции УНТ с учетом структурного искажения стенок УНТ в перекрестных соединениях. Структурное искажение моделируется псевдопотенциальной энергией, которая состоит из потенциала Леннарда-Джонса, взаимодействия Ван-дер-Ваальса между УНТ и энергии изгиба стенок УНТ. Результаты моделирования показывают лучшее соответствие экспериментальным данным, а анизотропия электрических свойств выровненных композитов полимер/УНТ в основном зависит от средней плотности проводящих путей УНТ, которая в значительной степени зависит структуры от выравнивания УНТ.

Более новая аналитическая модель позволяет учесть влияние дисперсии УНТ и эффекта туннелирования [121] и описывает эффективную проводимость композита следующей формулой:

$$\sigma = M \sigma_e, \quad (1.7)$$

$$M = \frac{5f\varphi_f l_e}{27\left(\frac{\varphi_p}{\varphi_f}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot \exp\left[\frac{18}{5}\left(\frac{\varphi_p}{\varphi_f}\right)^{\frac{1}{3}}\right] + 15l_e},$$

$$l_e = \frac{l}{\lambda}, \quad \sigma_e = \frac{\sigma_f}{\lambda}, \quad d = d_p \left(\frac{\varphi_p}{\varphi_f}\right)^{1/3},$$

где φ_f – объемная доля УНТ, f – доля УНТ, относящаяся к перколированной сети, l – средняя длина УНТ, l_e – эффективная длина УНТ с учетом волнистости $\lambda > 1$, σ_f – собственная электропроводность УНТ, σ_e – электропроводность с учетом волнистости, d – расстояние между соседними проводящими частицами (т.е. расстояние туннелирования), φ_p – порог перколяции, d_p – расстояние между соседними УНТ, когда происходит перескок электронов, которое предполагается равным 1.8 нм. Порог перколяции для идеальной дисперсии дается выражением: $\varphi_p = \frac{27\pi R^2}{4l^2}$, с другой стороны, для УНТ, полностью агломерирующихся в более крупные частицы в композитах $\varphi_p = \frac{nV_{cnt}}{L^3}$, где n – количество УНТ в агломерате ($n > 1$, $n = 1$ соответствует идеальной дисперсии).

В представленных формулах используются параметры, например, такие как волнистость, собственная проводимость УНТ, расстояние между соседними УНТ, которые трудно измеримы экспериментально, поэтому использование точных теоретических моделей не всегда обосновано с практической точки зрения. В работе [122] предложена упрощенная микромеханическая модель на основе элементарной ячейки для прогнозирования эффективной электропроводности композита, в которой контактное сопротивление между УНТ учитывалось с помощью уравнения Симмонса. Расчет эффективной длины одиночной УНТ, диспергированной в матрице, производился на основе гауссовой статистики. Результаты моделирования эффективной электропроводности сильно зависят от контактного сопротивления между УНТ и волнистости УНТ.

По сравнению с существующими моделями перколяционной сети УНТ, в [123] есть два основных улучшения: УНТ предполагаются деформируемыми и учтено сопротивление, вызванное структурным искажением УНТ. Анализ

показывает, что анизотропные электрические свойства выровненных композитов полимер/УНТ в основном зависят от средней плотности проводящих путей, которая изменяется в зависимости от состояния выравнивания УНТ в полимерной матрице.

Рассмотренные модели позволяют рассчитать электропроводность на постоянном токе с учетом эффекта перколяции. Для определения электрофизических параметров на СВЧ используют понятие комплексной диэлектрической проницаемости:

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - i\varepsilon'', \quad (1.8)$$

где ε' - действительная часть диэлектрической проницаемости показывает во сколько раз сила взаимодействия двух электрических зарядов в среде меньше, чем в вакууме, ε'' - мнимая часть диэлектрической проницаемости характеризует потери (поглощение электромагнитной волны). В случае проводящих сред потери в основном определяются величиной электропроводности σ и выражение для мнимой части при частоте электромагнитного излучения ω принимает вид:

$$\varepsilon'' = \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \omega} \quad (1.9)$$

Существует множество моделей, позволяющих вычислять эффективную диэлектрическую проницаемость композитов, содержащих проводящие включения, например, модель Максвелла Гарнетта [124], Ландау-Лифшица-Лойенги или Лихтенеккера [125, 126]. Такого рода модели в основном применимы в случае частиц сферической формы. Для учета частиц неправильной формы используются корректирующие коэффициенты.

В [127] рассчитывались параметры полимерных композитных материалов по формуле Нильсена. Анализ композитов, содержащих вытянутые включения, может быть осуществлен с использованием метода ЕМТ (Effective Medium Theory), посредством изменения такого показателя, как деполяризующий фактор [128].

В [25] по модели смешения Бругеммана была произведена оценка электрофизических параметров частиц стеклометаллического ферромагнитного

порошка, что позволило произвести расчёт частотной зависимости коэффициента отражения от стеклометаллического композиционного материала.

Для расчета параметров волокнистых композитов в [129] использовался метод Монте-Карло. Композит представлял собой тонкую пластину, нитевидные включения в которой были распределены равномерно по всей матрице. Ориентация волокон была учтена в [130].

В работе [114] проведены расчеты концентрационной зависимости диэлектрической проницаемости по модели Максвелла-Гарнетта:

$$\varepsilon_{eff} = \varepsilon_m + \varepsilon_m \frac{\frac{\varphi}{3} \sum_{j=x,y,z} \frac{\varepsilon_f - \varepsilon_m}{\varepsilon_m + N_j (\varepsilon_f - \varepsilon_m)}}{1 - \frac{\varphi}{3} \sum_{j=x,y,z} \frac{N_j (\varepsilon_f - \varepsilon_m)}{\varepsilon_m + N_j (\varepsilon_f - \varepsilon_m)}}, \quad (1.10)$$

где ε_{eff} – эффективная диэлектрическая проницаемость композита, ε_f и ε_m – диэлектрические проницаемости включений и матрицы, φ – объемная доля включений, N_j – деполяризующий фактор частиц в форме эллипсоидов в направлении $j = x, y, z$. Анализ показал, что расчеты в рамках модели Максвелла-Гарнетта, учитывающие диэлектрические характеристики компонентов композита и аспектное отношение нанотрубок, используемых в качестве наполнителя, дают совпадение с экспериментальными данными только в области менее 0.6 об.%. Более того, замена УНТ эллипсоидами в формуле (1.10) может приводить к возникновению погрешности, оценка которой не была произведена.

Как было отмечено в [131], при вычислении эффективной магнитной проницаемости, пока разность между магнитной проницаемостью включений и матрицы мала, также может использоваться формула Максвелла-Гарнетта. Соотношение, ограничивающее возможность применения теории эффективной среды для вычисления микроволновой магнитной проницаемости композитов, вытекает из теории ферромагнитного резонанса Киттеля. Другое ограничение, касающееся полосы пропускания поглотителей электромагнитных волн, вытекает из соотношений Крамерса-Кронига для коэффициента отражения. Эти ограничения важны при проектировании и анализе поглотителей электромагнитных волн и других устройств, использующих микроволновые

магнитные свойства композитов, таких как магнитные подложки для микроволновых антенн.

Как известно, модели смесей диэлектрических проницаемостей, а именно модель Максвелла-Гарнетта и модель Бруггемана, дают существенные отклонения от эксперимента при расчетах для композитов с содержанием наполнителя выше порога перколяции. Как было показано ранее [132], состояние границ интерфейса является одним из определяющих факторов формирования диэлектрической проницаемости композита. Под интерфейсом понимается межфазная граница между двумя пространственными областями, занятыми разными материалами. Современный подход заключается в рассмотрении композитов ЭС/УНТ как трехкомпонентной системы, состоящей из двух основных компонентов (полимерной матрицы и проводящего наполнителя) и области интерфейса, свойства которой выводятся из характеристик двух других компонентов композита. Поэтому в [114] был также произведен расчет диэлектрической проницаемости исследуемых композитов в линейном приближении интерфейсной степенной модели с использованием уравнения (1.11), которое дает хорошее согласие экспериментальных данных и модельных расчетов в диапазоне содержания наполнителя до 0.9 об. %.

$$\varepsilon_{eff} = \varphi_f(\varepsilon_f - \varepsilon_m) + S_f \Delta r \rho_f \varphi_f(\varepsilon_i - \varepsilon_m) + \varepsilon_m, \quad (1.11)$$

где φ_f , φ_i , φ_m и ε_f , ε_i , ε_m определяют объемную долю и диэлектрическую проницаемость наполнителя интерфейсной области и матрицы композита, соответственно, S_f ($\text{м}^2/\text{г}$) – удельная поверхность наполнителя, а ρ_f ($\text{г}/\text{м}^3$) – плотность наполнителя. Было определено, что радиус интерфейсного слоя составляет $\Delta r = 40$ нм. В рассматриваемой работе исследовались композиты из неориентированных УНТ.

В [133] с использованием СВЧ-волноводных методов была экспериментально определена комплексная диэлектрическая проницаемость пленок, содержащих вертикально выровненные МУНТ. В программе CST

производилось моделирование композита с эффективными параметрами, при этом сами структуры из МУНТ не подвергались расчету.

Рассмотренные модели позволяют рассчитывать параметры композита при известных исходных данных о параметрах и распределении УНТ. Однако не было представлено моделей, позволяющих по экспериментальным данным рассчитывать эффективные параметры ориентированных нитевидных включений. Не исследовалась степень анизотропии диэлектрической проницаемости и электропроводности включений из УНТ. Не было представлено теоретических моделей, описывающих степень анизотропии свойств и позволяющую прогнозировать параметры композитов.

К недостаткам моделей, описанных выше, можно отнести то, что они предназначены для определения эффективных параметров композитных материалов только в том случае, если включения распределены однородно. В [134] эффективные электрофизические параметры предлагается рассчитывать с учетом структуры электрического поля внутри волноводного канала по общей объемной формуле. Данный метод применим для расчета параметров многослойных структур. Однако в работе не рассмотрена возможность применения данной модели для расчета параметров неоднородных композитов.

Таким образом, электропроводность композитов с УНТ имеет достаточно сложный механизм. Существует множество моделей, учитывающих непрямолинейность УНТ, эффект туннелирования между УНТ в полимерной матрице, влияние интерфейса и прочее. Помимо концентрации УНТ следует учитывать и их ориентацию в композите. В простейшем случае композиты с ориентированными УНТ можно рассматривать как волокнистые композиты. Для практического применения, можно ограничиться рассмотрением эффективной объемной электропроводности нитей, не вдаваясь в подробности переноса заряда между отдельными УНТ, из которых эти нити состоят. Существующие модели эффективных сред позволяют рассчитывать комплексную диэлектрическую проницаемость таких композитов при малых объемных долях и равномерном распределении нитей по объему композита. Поэтому актуальной является задача

разработки модели, позволяющей рассчитывать электрофизические параметры композитов, содержащих тонкие проводящие нити, при больших объемных долях и неравномерном распределении нитей.

1.5 Методы исследования электрофизических параметров композитных материалов

Методы измерения параметров материалов можно разделить на контактные и бесконтактные. Контактные методы не требуют сложной аппаратуры, обработка экспериментальных данных достаточно проста. В [24] показано, что проводимость на постоянном токе композита ЭС/УНТ с ориентированными УНТ возрастает более чем на 10 порядков относительно образца с неориентированными УНТ, для которого электропроводность почти совпадает с чистой эпоксидной смолой. Контактные методы имеют существенный недостаток, связанный с необходимостью обеспечения омического контакта между исследуемым образцом и зондом. Свойства контакта могут изменяться в зависимости от температуры, что приводит к сложностям при определении электрофизических параметров в широком интервале температур. Зачастую использование зонда приводит к разрушению поверхности образца. Особенно затруднительно использование зондовых методов при измерении параметров высокоомных материалов. Обычно зондовые методы позволяют измерять на одной установке только один параметр. Более того, контактными методами возможно измерение параметров на постоянном токе или низких частотах, а практическая область применения композитов с проводящими и магнитными наполнителями в большинстве случаев связана с СВЧ-диапазоном. Таким образом, измерение электрофизических параметров композитов предпочтительно бесконтактными методами, к которым относятся СВЧ-методы измерения [135].

Методика, заключающаяся в анализе измеренных значений микроволновой магнитной проницаемости, полученных при внешнем магнитном поле, позволила определить физические механизмы, приводящие к появлению пиков магнитных

потерь для композитов, наполненных чешуйчатыми частицами порошка сендаста (сплав Fe-Al-Si) [27].

Производить анализ СВЧ-цепи можно, измеряя падающую и отраженную электромагнитную волну на ее входах/выходах (рис. 1.6). Взаимосвязь между указанными волнами устанавливается посредством частотно-зависимой волновой матрицы рассеяния (1.12), также известной как матрица S -параметров:

$$\begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix}. \quad (1.12)$$

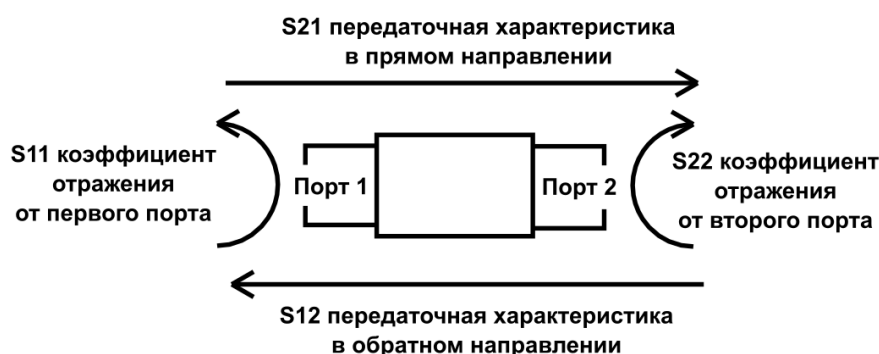


Рисунок 1.6 – Анализ СВЧ-цепи в терминах S параметров.

Среди СВЧ-методов можно выделить: метод свободного пространства, волноводные и резонансные методы [26, 136].

Метод свободного пространства оптимален для неразрушающего контроля листовых материалов большой площади [137], позволяет производить измерения при высоких температурах. Основная идея метода заключается в измерении комплексных коэффициентов передачи S_{21} и отражения S_{11} при прохождении тестового сигнала, излучаемого антеннами, через исследуемый листовой материал. Поляризация антенн может варьироваться для исследования параметров анизотропных материалов. В [138] была разработана автоматизированная система измерения для неразрушающего контроля волокнистых композитов. Эффективность установки в свободном пространстве была подтверждена путем измерения коэффициентов пропускания/отражения от композитов на основе микропроводов в диапазоне от 0.5 до 20 ГГц в различных магнитных полях. Однако для высокой точности измерений требуется большое количество материала и безэховая камера.

Автогенераторный метод [139] позволяет производить измерения диэлектрической проницаемости по установившейся частоте автогенератора, при внесении исследуемого композита в поле передающей катушки, с высокой относительной точностью 10^{-5} , но в области низких частот до 10 кГц, при этом в работе не указано на возможность определения электропроводности.

Повышение точности СВЧ-измерений достигается за счет применения резонансных методов [140, 141]. Данные методы основаны на регистрации сдвига резонансной частоты коэффициента отражения при помещении исследуемого образца внутрь объемного резонатора. Одним из популярных методов диэлектрического резонанса является метод резонанса Хакки–Коулмена, в котором цилиндрический диэлектрический стержень помещается между двумя параллельными металлическими пластинами. Для передачи мощности на входе и выходе используются две связывающие антенны. Измеряемым параметром является коэффициент передачи S_{21} . Для измерений может быть применена мода TE_{011} [140]. Для измерения небольших образцов может быть применен метод возмущений [141]. Небольшой диэлектрический образец в резонансной полости вызовет сдвиг резонансной частоты и уменьшение добротности полости. Комплексная диэлектрическая проницаемость образца может быть затем рассчитана из изменений резонансной частоты и добротности металлической полости. Образец всегда стремятся располагать там, где электрическое поле максимально. В [142] была определена диэлектрическая проницаемость композиционных материалов на основе полиметилметакрилата и МУНТ методом открытого квазиоптического резонатора, однако погрешность оказалась значительной (10%) и не была определена электропроводность композита.

К недостаткам резонансных методов можно отнести высокие требования к точности изготовления волноводных резонаторов, искажения частотной зависимости коэффициента отражения из-за паразитных отражений и переотражений в волноводном тракте, затруднения при измерении в широком диапазоне частот, связанные с необходимостью использования нескольких волноводных резонаторов с разной собственной частотой резонанса.

Основным преимуществом волноводных методов является возможность измерения малого количества материала в широком диапазоне частот. Основная идея метода заключается в измерении комплексных коэффициентов передачи S_{21} и отражения S_{11} при прохождении тестового сигнала через закрытую линию передачи без образца и с образцом исследуемого материала. Для проведения измерений используются векторные анализаторы цепей. Математическая обработка результатов осуществляется различными методами, например, Николсона-Росса-Вейера [143]. Экспериментальные данные, приведённые в [144], указывают на корреляцию параметров композитных материалов, определенных волноводным, коаксиальным и резонаторным методами. Выявлено, что порошок гексаферрита W-типа, добавленный в композит, содержащий МУНТ, качественно сохраняет частотную зависимость диэлектрической проницаемости, увеличивая ее численное значение примерно на 5-7 отн. ед.

Нерезонансные методы обладают рядом недостатков, к которым можно отнести, высокие требования к точности изготовления образцов и закрытых линий передачи, при этом образец должен быть изотропный и однородный, дорогостоящее оборудование (векторный анализатор цепей), позволяющее производить измерения фазы и амплитуды коэффициентов передачи и отражения с высокой точностью.

Преимущества метода свободного пространства и резонансных методов были объединены в [145]. Был разработан новый микроволновый цилиндрический резонаторный датчик, в котором открытая полость и проводящий композит образуют резонансную систему, в которой наличие покрытия влияет на поверхностное сопротивление, вызывая изменение резонансной частоты.

Преимущества волноводных и резонансных методов сочетают в себе методы определения параметров с использованием СВЧ фотонных кристаллов [28], представляющих собой периодические структуры, элементы которых отличаются размерами и электрофизическими параметрами. Внесение нарушения в периодичность приводит к появлению на частотной зависимости коэффициента отражения СВЧ-излучения от такой структуры резкого минимума – дефектной

моды, положение которой определяется параметрами нарушенного слоя. В качестве волноведущей системы могут использоваться коаксиальная [146-148], микрополосковая [149-152] линия передачи, а также полый волновод [30, 153, 154].

В [146] измерялись S -параметры коаксиальной линии, заполненной диэлектриком – силикагелем, однако диэлектрическая проницаемость не вычислялась и не представлено сведений о погрешности измерений. В отличие от [146] в [147, 148] исследовались S -параметры коаксиальной линии, заполненной периодическими слоями из тефлона и воздуха с нарушением в виде измеряемого образца (брэгговской или фотонной структурой). Показано, что следует выбирать дефектную моду, на частоте которой в области расположения дефекта наблюдается максимум стоячей волны. Однако в связи с радиальной симметрией коаксиальных линий затруднен расчет анизотропных материалов указанными методами.

В [149] предлагается метод определения комплексной магнитной и диэлектрической проницаемости с использованием автоматической и широкополосной (45 МГц-18 ГГц) системы, измеряющей S -параметры микрополоскового испытательного устройства. Добиться повышения точности измерений возможно с использованием микрополоскового фотонного кристалла [150]. Измеряемый образец может являться частью фотонного кристалла, располагаться в качестве подложки одного из отрезков периодической структуры, либо находиться непосредственно над полосковым проводником. В [151] с использованием фотонных микрополосковых структур была определена комплексная диэлектрическая проницаемость композита ЭС/МУНТ и вычислена комплексная диэлектрическая проницаемость УНТ, которая составила $\epsilon_{cnt} = 62.2 - 12.4i$. В [152] проведено математическое моделирование конструкции микрополосковой линии со встречно-штыревым резонатором и экспериментальное измерение действительной части диэлектрической проницаемости полимерных композитных наноматериалов на основе матриц из полиэтилена в сантиметровом диапазоне радиоволн. Однако в рассматриваемых работах не производились измерения анизотропных материалов. К недостаткам микрополосковых методов

можно отнести технологические трудности при размещении исследуемого образца под полоском, и усложнение расчетов при размещении образца над полоском.

Для оценки параметров полупроводников и поглощающих структур в [153-155] применяется СВЧ фотонный кристалл, располагаемый в тракте прямоугольного волновода. Определение параметров материалов базируется на решении обратной задачи путем минимизации разности измеренных и вычисленных коэффициентов отражения и пропускания на частоте дефектной моды. Измеряемый образец при этом размещается в качестве нарушения в центральном слое. Путем подбора соотношения между продольным размером нарушения и длиной стоячей волны реализуется либо эффект прозрачности фотонного кристалла с проводящим нанослоем, либо подавление дефектной моды [30]. В [156] сплошной слой воды располагался не в качестве нарушения, а за фотонным кристаллом, при этом возникали фотонные таммовские состояний в запрещенной зоне, которые наблюдались экспериментально в виде резонансных минимумов на частотной зависимости коэффициента отражения. Величина минимума определяется толщиной структуры, а частота величиной воздушного зазора. Данная конфигурация открывает возможность использования фотонных структур для контроля параметров композита в процессе изготовления путем размещения композита снаружи волновода, внутри которого располагается СВЧ фотонный кристалл. Однако имеется трудность, связанная с отражением СВЧ-волны на открытом конце волновода.

Таким образом, наиболее предпочтительным методом, позволяющим исследовать с высокой точностью электрофизические параметры анизотропных композитов малых объемов, является волноводный метод с использованием СВЧ фотонного кристалла с нарушением периодичности в виде исследуемого образца.

2 УПРАВЛЕНИЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЧАСТОТНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩЕГО С КОМПОЗИТАМИ НА ОСНОВЕ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ

Когда магнитное поле воздействует на магнитную жидкость, в ней возникают структурные изменения: ферромагнитные наночастицы объединяются, образуя нитевидные структуры или агломераты. Учет данных структур необходим при разработке магнитооптических устройств. Кроме этого, при приложении магнитного поля в магнитной жидкости возникает ферромагнитный резонанс [111], проявляющийся в эффективном поглощении электромагнитного излучения. Частота электромагнитного излучения определяет величину индукции магнитного поля, соответствующую условиям возникновения ферромагнитного резонанса. Эту особенность можно использовать при разработке компонентов СВЧ-техники, управляемых магнитным полем.

2.1 Взаимодействие лазерного излучения с различными длинами волн с композитами на основе магнитной жидкости, содержащей углеродные нанотрубки

2.1.1 Теоретическое обоснование методики измерений

Анизотропное светорассеяние позволяет определить наличие агломератов в магнитной жидкости [157]. Процесс агломерации при изменении магнитного поля происходит в несколько стадий, подробно динамика этого процесса исследовалась в [19]. Модуляция электромагнитного излучения оптического диапазона осуществима с использованием композитов, оптическими свойствами которых можно управлять [99, 158].

Авторы работы [34] изучили зависимость пропускания поляризованного оптического излучения магнитной жидкостью от модуля и направления вектора индукции магнитного поля. В отличие [38, 100] в настоящей работе производилось экспериментальное определение глубины модуляции от длины волны

поляризованного оптического излучения. Эксперименты проводились с использованием полупроводниковых лазеров с длинами волн 450 нм, 530 нм и 650 нм.

Расчет глубины модуляции поляризованного оптического излучения осуществлялся по следующей формуле:

$$M = \frac{U_{max} - U_{min}}{U_{max}}, \quad (2.1)$$

где U_{min} и U_{max} – величина сигнала, фиксируемого с фотодетектора при параллельной и перпендикулярной ориентации электрической компоненты лазерного излучения и вектора магнитной индукции.

Ослабление интенсивности монохроматического параллельного светового пучка при его распространении в поглощающей среде описывается законом Бугера – Ламберта – Бера:

$$I(L, \lambda) = (1 - R) \cdot I_0 \cdot e^{-k(\lambda) \cdot L}, \quad (2.2)$$

где I_0 и $I(L, \lambda)$ – интенсивность оптического излучения, падающего, и, прошедшего через слой с суспензией, L – толщина слоя, R – коэффициент отражения, $k(\lambda)$ – коэффициент экстинкции. Коэффициент экстинкции складывается из двух основных составляющих:

$$k(\lambda) = k_{abs}(\lambda) + k_{sc}(\lambda) \quad (2.3)$$

где k_{abs} – коэффициент поглощения, k_{sc} – коэффициент рассеяния.

Коэффициент экстинкции k определяется как спектральным составом (длиной волны λ) оптического излучения, так и структурными характеристиками поглощающей дисперсной системы. Дополнительно следует отметить зависимость коэффициента экстинкции от состояния поляризации излучения. Это обусловлено различиями в усредненных по ансамблю агломератов их геометрических сечений для двух взаимно ортогональных состояний поляризации пучка. С целью количественной оценки указанных различий используются специализированные подходы, в частности метод дискретных диполей (DDA). Реализация этих подходов характеризуется высокой алгоритмической и вычислительной сложностью. Настоящее исследование ограничивается качественным анализом механизмов

зависимости экстинкции от поляризации светового пучка в среде с ориентированными магнитным полем агломератами. Взаимное изменение ориентации вектора магнитной индукции и агломератов из магнитных наночастиц обуславливает соответствующее изменение показателя экстинкции k .

2.1.2 Экспериментальное определение глубины модуляции лазерного излучения при прохождении через композит магнитная жидкость – углеродные нанотрубки

В качестве объекта исследования выступала магнитная жидкость, представляющая собой коллоидный раствор наночастиц магнетита (Fe_3O_4) в керосине, стабилизированных олеиновой кислотой. Значение среднего диаметра наночастиц составляло 10 нм, объемной доли твердой фазы – 0.1. Из представленных на рис. 2.1 данных следует, что рост индукции внешнего магнитного поля приводит к увеличению продольных размеров агломератов. Фотографии получены при 280-кратном увеличении с использованием цифрового оптического микроскопа HIROX KH-7700 (Hirox, Япония).

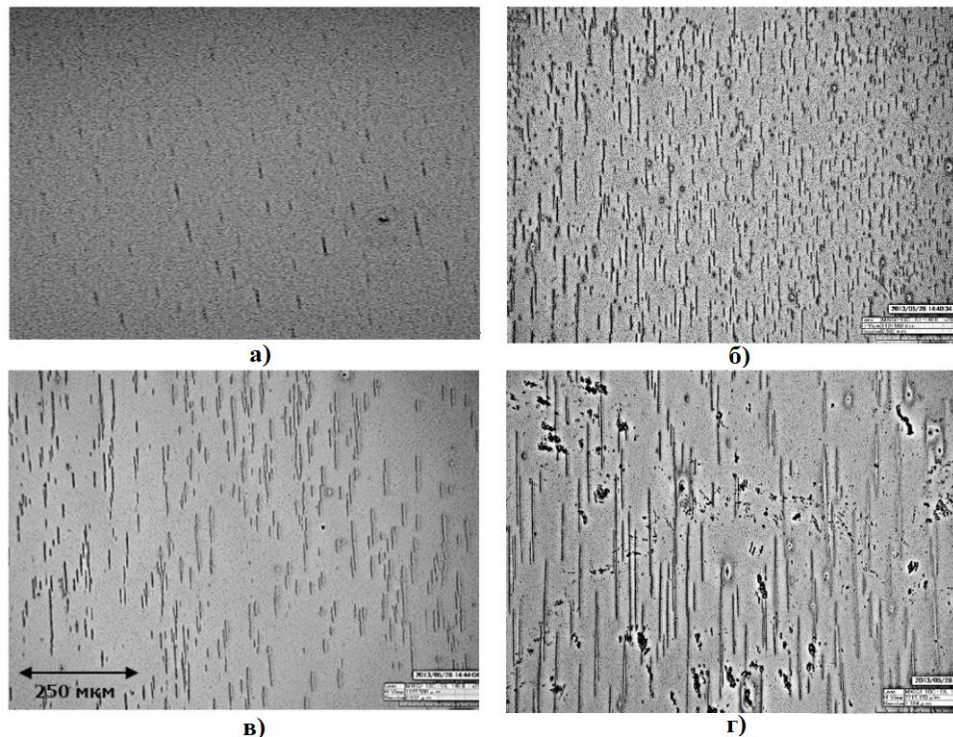


Рисунок 2.1 – Структурные изменения в слое магнитной жидкости под влиянием магнитного поля с индукцией: а) 25 мТл, б) 50 мТл, в) 115 мТл, г) 140 мТл.

Образец суспензии был получен путём перемешивания навески многостенных углеродных нанотрубок серии «Таунит-М» (диаметр 10-30 нм, длина более 2 мкм) с магнитной жидкостью на магнитной мешалке в течение 20 минут. С целью предотвращения агломерации нанотрубок полученную суспензию помещали в ультразвуковую ванну, где обрабатывали в течение 1 часа (частота 40 кГц). Для проведения экспериментов были подготовлены три суспензии с различным содержанием УНТ: 0% (контрольный образец №1), 0,1% (№2) и 0,2% (№3) по массе. Исследуемую суспензию помещали в стеклянные кюветы фиксированной толщины (100 мкм). При этом площадь ячейки многократно превосходила диаметр лазерного луча.

Для наблюдения за структурой агломератов, состоящих из ферромагнитных наночастиц и УНТ, был проведен эксперимент по высушиванию тонкого слоя магнитной жидкости, как с добавлением нанотрубок, так и без них (рис. 2). Анализ результатов, представленных на рисунке 2.2б, показывает интересную закономерность: углеродные нанотрубки выстраиваются вдоль агломератов магнитной жидкости.

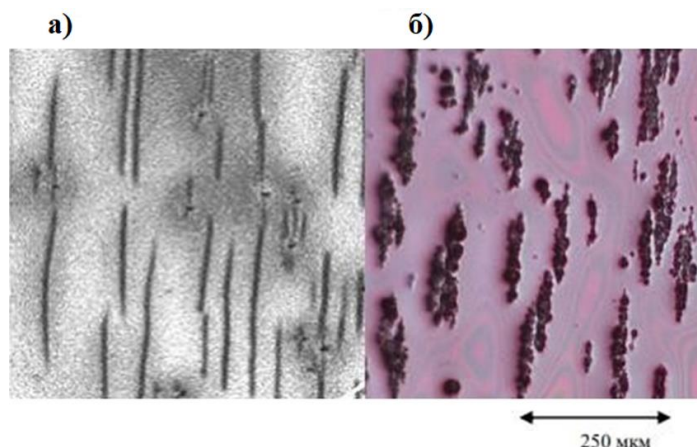


Рисунок 2.2. Изображения тонкого слоя магнитной жидкости после процесса высушивания в присутствии внешнего магнитного поля с индукцией 140 мТл: а) без нанотрубок, б) с углеродными нанотрубками.

Схема экспериментальной установки показана на рис. 2.3. Ячейки с исследуемой суспензией 3 ориентировались в магнитном поле так, чтобы вектор индукции магнитного поля был параллелен поверхности кюветы. В качестве источника магнитного поля использовалась система катушек Гельмгольца

(электромагнит 5). Контроль индукции магнитного поля в зоне расположения магнитной жидкости осуществлялся с помощью датчика Холла. Эксперименты проводились при изменении индукции магнитного поля в интервале от 12 до 140 мТл.

Оптическое излучение генерировалось полупроводниковым лазером 1. Сгенерированный пучок направлялся через поляризатор 2. Фотодиод 4 использовался для регистрации излучения, прошедшего через исследуемую суспензию. Мощность излучения лазеров была настроена так, чтобы показания фотодиода в отсутствие магнитного поля были одинаковыми и равными 20.5 мВ.

Взаимная ориентация вектора поляризации света и вектора магнитной индукции варьировалась в диапазоне 0–360°. Поворот лазера совместно с поляризатором осуществлялся серводвигателем относительно вертикальной оси установки. Сигнал с фотодиода сначала регистрировался, а затем оцифровывался и передавался на ЭВМ.

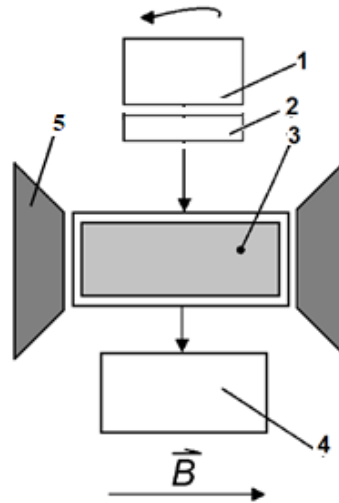


Рисунок 2.3 – Схема экспериментальной установки: 1 – лазер; 2 – поляризатор; 3 – измерительная ячейка с суспензией; 4 – регистрирующий фотодиод; 5 – электромагнитная система.

При повороте лазера наблюдались изменения в интенсивности лазерного излучения, проходящего через ячейку с исследуемой суспензией. Это обусловлено тем, что менялась ориентация электрической составляющей лазерного излучения по отношению к агломератам, которые формировались ферромагнитными наночастицами в магнитной жидкости под влиянием магнитного поля.

2.1.3 Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 2.4 представлены графики, показывающие, как меняется интенсивность лазерного излучения с разными длинами волн после прохождения через образец №1 (без УНТ) от угла α – угла между направлением электрического вектора лазерного излучения и вектором магнитной индукции. Величина магнитной индукции в измерениях составляла 100 мТл.

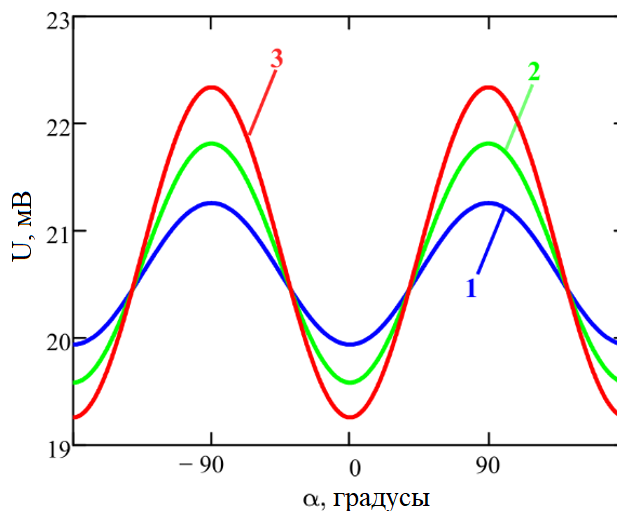


Рисунок 2.4 – Отклик фотодиода в зависимости от взаимной ориентации вектора поляризации оптического излучения с различной длиной волны (1 – 450 нм, 2 – 530 нм, 3 – 650 нм), проходящего через образец №1, и вектора магнитной индукции величиной 100 мТл.

Совпадение направлений вектора индукции магнитного поля и электрического вектора поляризованного оптического излучения (угол $\alpha = 0$), приводит к максимальному поглощению, что соответствует минимальному значению напряжения на фотодиоде. Электрическое поле линейно поляризованного оптического излучения наиболее эффективно взаимодействует агломератами в том случае, когда направление электрического вектора совпадает с направлением агломератов, при этом становится максимальным коэффициент экстинкции k . В обратном случае, когда агломераты и вектор электрического поля поляризованного оптического излучения ориентированы ортогонально друг другу, коэффициент экстинкции k становится минимальным. Следовательно, изменение направления вектора магнитной индукции позволяет эффективно управлять мощностью прошедшего через магнитную суспензию лазерного излучения.

Изменение глубины модуляции мощности линейно поляризованного оптического излучения с увеличением индукции магнитного поля отображено на рис. 2.5. Каждая кривая соответствует глубине модуляции оптического излучения, генерируемого лазерами с различными длинами волн.

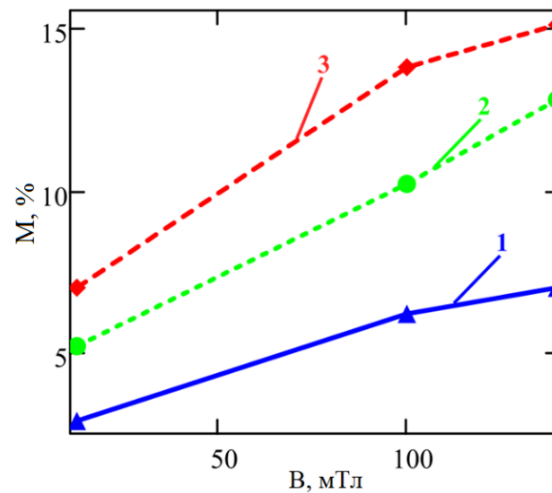


Рисунок 2.5 – Влияние величины магнитной индукции на глубину модуляции линейно поляризованного оптического излучения, проходящего через слой магнитной жидкости с агломератами при длине волны излучения: 1. - 450 нм, 2 - 530 нм, 3 - 650 нм.

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.

Рост глубины модуляции с увеличением длины волны лазерного излучения обусловлен снижением поглощения света, что связано с уменьшением электрической толщины агломератов.

Добавление МУНТ приводит к их выстраиванию вдоль нитевидных агломератов, состоящих из ферромагнитных наночастиц, вследствие чего электропроводимость и толщина агломератов возрастает. Теперь агломераты следует рассматривать как комплексы с высокой проводимостью, состоящие из ферромагнитных частиц и МУНТ. 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. 2.6) поляризованного оптического излучения, прошедшего через

суспензию МЖ/МУНТ. Глубина модуляции возрастает при увеличении массовой доли МУНТ в МЖ (табл. 2.1).

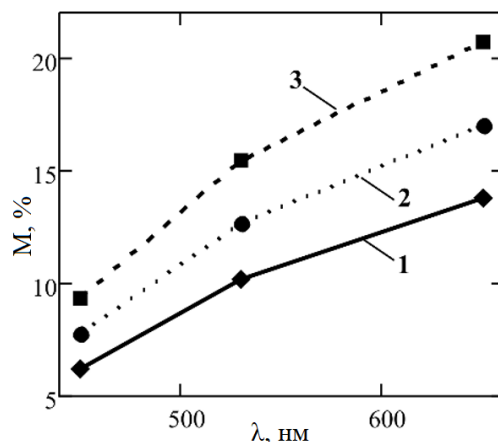


Рисунок 2.6 – Зависимость глубины модуляции от длины волны поляризованного лазерного излучения, проходящего через суспензию МЖ/МУНТ с массовой долей МУНТ: 1 – без нанотрубок (образец №1), 2 – 0.1% (образец №2), 3 – 0.2% (образец №3). Использовалось магнитное поле с индукцией 100 мТл.

Таблица 2.1 – Глубина модуляции линейно поляризованного лазерного излучения в исследуемых образцах при различной величине индукции внешнего магнитного поля и различных длинах волн оптического излучения.

№ Образца / sample no.	Значение индукции магнитного поля, мТ / Magnetic field induction, mT	Глубина модуляции, % / Modulation depth, %		
		450 nm	530 nm	650 nm
1	12	2.9	5.2	7.0
	100	6.2	10.2	13.8
	140	7.0	12.8	15.1
2	12	3.6	6.5	8.75
	100	7.8	12.7	17.0
	140	8.7	15.9	18.9
3	12	4.3	7.7	10.4
	100	9.3	15.4	20.7
	140	10.4	19.1	22.8

Полученные результаты доказывают, что изменение величины и направления магнитной индукции служит способом управления мощностью поляризованного света в магнитных жидкостях, модифицированных МУНТ. Величина глубины модуляции зависит от длины волны лазерного излучения (450, 550 и 650 нм). Рост длины волны лазерного излучения и индукции магнитного поля способствует увеличению глубины модуляции поляризованного света. Максимальная величина модуляции через ячейку, содержащую магнитную жидкость без МУНТ, достигала 15% при длине волны лазерного излучения 650 нм. Добавление МУНТ с высокой электропроводностью в магнитную жидкость приводит к росту (примерно в полтора раза) глубины модуляции.

2.2 Взаимодействие СВЧ-излучения с композитами эпоксидная смола / магнитная жидкость.

Фотонные кристаллы представляют собой искусственные периодические структуры с периодом близким к длине волны электромагнитного излучения. Важным свойством фотонных кристаллов является их способность к сильному отражению электромагнитных волн в частотном диапазоне запрещённой зоны. Изменяя параметры хотя бы одного слоя, можно контролировать амплитудно-частотные характеристики кристалла. Возможность управления характеристиками СВЧ фотонного кристалл с использованием электрического поля исследуется в [159]. Управление магнитным полем осуществимо в структуре, в которой один или несколько слоев содержит материал с параметрами, зависящими от величины или направления индукции магнитного поля. В настоящее время множество работ посвящено изучению свойств композитов на основе диэлектрических материалов, содержащих различного рода наночастицы. Магнитная жидкость является одним из примеров таких композиционных материалов. При добавлении магнитной жидкость в другую жидкую среду получается магнитная эмульсия. Взаимодействие СВЧ-излучения с такого рода эмульсиями изучалось в [109].

В настоящей работе [35, 44] исследуется возможность управления амплитудно-частотными характеристиками СВЧ фотонного кристалла при приложении магнитного поля к нарушенному слою кристалла. Нарушенным слоем выступали образцы, представляющие собой композит на основе эпоксидной смолы, в которую помещалась магнитная жидкость (ЭС/МЖ). Исследовалось влияние объемной доли магнитной жидкости в композите на характеристики СВЧ фотонного кристалла.

2.2.1 Методика проведения эксперимента

Фотонный кристалл представлял собой периодическую 11-слойную структуру (рис. 2.7а). Исследования производились в сверхвысокочастотном диапазоне от 8 до 12 ГГц. Выбор толщины и диэлектрической проницаемости слоев осуществлялся с целью добиться резкого минимума коэффициента отражения от фотонной структуры в требуемой области частот.

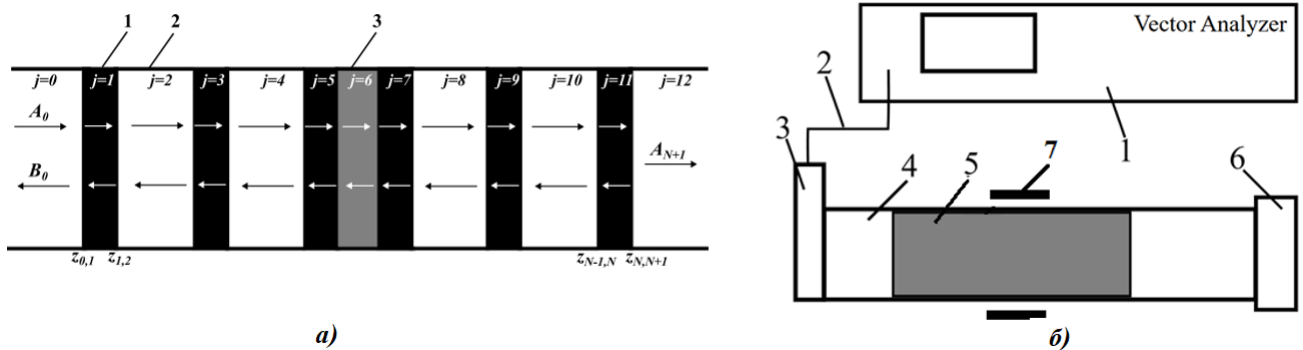


Рисунок 2.7 – Схема измерительной установки и фотонной структуры: а) продольное сечение волновода с исследуемой одиннадцатислойной структурой, состоящей из чередующихся слоев поликора (1) и фторопласта (2), в центральном слое размещен исследуемый композит (3), j – номер слоя, $z_{j,j+1}$ – удаление границы раздела между слоями j и $j + 1$ от внешней поверхности периодической структуры, A_j и B_j – амплитуды электромагнитных волн, распространяющихся в j -ом слое в прямом и обратном направлениях; б) схема измерительной установки: 1 – векторный анализатор цепей, 2 – коаксиальный кабель, 3 – коаксиально-волноводный переход, 4 – секция прямоугольного волновода, 5 – фотонный кристалл с исследуемым образцом, 6 – согласованная нагрузка, 7 – обкладки электромагнита.

Керамические пластины толщиной $d_{Al_2O_3} = 1.0$ мм, состоящие из поликора Al_2O_3 с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 9.6$, использовались в качестве слоев структуры с нечетными номерами. Фторопластовые образцы с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 2$ и толщинами $d_{fp} = 9.8$ мм использовались в качестве слоев структуры с четными номерами. Зазоры между поверхностью слоев и стенками волновода были минимальными, с целью избежать неоднородного заполнения в поперечном сечении волновода, что значительно усложнило бы теоретический анализ. Исследуемый образец представлял собой композитный материал и располагался в центральном слое. Параметры слоя с композитом отличались от остальных слоев. Разными были как диэлектрической проницаемостью, так и толщина, которая составляла $d_{comp} = 4$ мм. В результате возникало нарушение периодичности фотонной структуры.

Экспериментальные исследования коэффициента отражения электромагнитного излучения СВЧ-диапазона от фотонного кристалла проводились в трехсантиметровом диапазоне длин волн. В качестве измерительного оборудования использовался СВЧ-анализатор цепей Agilent Tech. 5242A PNA-X Network Analyzer (рис. 2.7б). Волновод располагался между катушками Гельмгольца, которые являлись источником магнитного поля. Магнитное поле было ориентировано параллельно электрической компоненте СВЧ-волны типа TE_{10} в прямоугольном волноводе, т.е. ортогонально его широкой стенке. 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 0.14.

Исследование характеристик структуры можно разделить на три серии. В первой серии измерений ставилась задача выявить, как влияет концентрация магнитной жидкости в эпоксидной смоле на частотные зависимости коэффициента отражения от фотонной структуры при приложении магнитного поля с различной величиной индукции. Вторая серия измерений касалась изучения влияния загустителя «Аэросил» (пирогенный диоксид кремния), который добавлялся в

композиты с различными объемными долями магнитной жидкости, при этом масса «Аэросила» в композитах оставалась постоянной. Третья серия измерений позволила выявить влияние объемной доли загустителя «Аэросил» при постоянной высокой объемной доле магнитной жидкости в композите.

В качестве центрального нарушенного слоя периодической структуры возможно использование магнитной жидкости и без эпоксидной смолы [42]. Для размещения магнитной жидкости внутри волновода была изготовлена кювета из оргстекла. Толщина стенок кюветы составляла 0.8 мм. Заполнение кюветы магнитной жидкостью осуществлялось через технологическое отверстие. Удалось получить слой магнитной жидкости с толщиной 1 мм. Минимум на частотной зависимости коэффициента отражения от фотонной структуры с нарушением при приложении магнитного поля к слою с магнитной жидкостью претерпевал значительные изменения по форме и положению вплоть до полного исчезновения. Однако точное теоретическое описание рассматриваемой структуры вызывает значительные затруднения. Это обусловлено тем, что магнитная жидкость не полностью занимает поперечное сечение волновода. Часть площади (область шириной порядка 1 мм по периметру) занята эпоксидной смолой, которая склеивает стенки кюветы. Более того, магнитная жидкость сильно притягивается к обкладкам электромагнита, в связи с чем существует технологическая проблема, связанная с герметизацией магнитной жидкости внутри СВЧ фотонного кристалла. Поэтому было принято решение для размещения магнитной жидкости в волноводе изготовить композитные материалы на основе твердой матрицы [35, 44]. В качестве объектов исследования выступали композиционные материалы на основе эпоксидной смолы и магнитной жидкости (ЭС/МЖ).

Процесс изготовления композитов состоял из следующих стадий:

1. *Изготовление силиконовых форм.* Мастер-модель, представляющая собой параллелепипед (25.0 x 10.0 x 4.0 мм) из фторопласта, располагалась в небольшой ёмкости таким образом, чтобы основанием являлась сторона с наименьшей площадью, другими словами, вертикально. Высота емкости была больше высоты мастер-модели. Два компонента силиконовой системы

смешивались в равных соотношениях по массе и заливались в емкость. Осуществлялось высушивание в течении суток, после чего застывший силикон отделялся от фторопластовой мастер-модели. Таким образом было изготовлено четыре одинаковых силиконовых молда (формы).

2. *Изготовление образцов композита.* В ЭС добавлялись отвердитель и МЖ, количество материалов контролировалось по взвешиванию. Осуществлялось механическое перемешивание полученной эмульсии в течении 5 минут. После чего эмульсия заливалась в силиконовые формы. Застывание форм происходило в течении суток при комнатной температуре, после чего образцы извлекались из форм. При больших объемных долях МЖ время высушивания увеличивалось до трех суток.
3. *Механическая обработка образцов.* Полученные композиты, представляли собой параллелепипед с габаритами 25.0 x 10.0 x 4.0 мм, что больше поперечного сечения волновода. Параллелепипед стачивался с торца до достижения размера широкой стенки волновода 23.0 мм. Стачиванием параллелепипеда именно с данной стороны удалось свести к минимуму погрешность измерений, связанную с несовершенством поверхности образца, т.к. сточенный срез располагался в области волновода, где электрическая составляющая СВЧ-поля является минимальной – возле узкой стенки волновода. Поверхности остальных сторон образцов не подвергались механической обработке, поэтому оставались достаточно ровными.

С использованием рассмотренного технологического процесса было изготовлено 20 образцов (табл. 2.2). Сгруппируем их в три серии. Первые две (серия 1 и серия 2) содержат образцы с разными объемными долями магнитной жидкости $\nu_{ff} = 0.004 \dots 0.350$. Образцы из серии 2 помимо магнитной жидкости содержали загуститель «Ааэросил». Объемная доля загустителя была одинаковой и составляла $\nu_{aerosil} = 0.010$. Парное изготовление образцов (1.1–2.1, 1.2–2.2 и т.д.) позволило достичь в соответствующих парах одинакового объемного содержания магнитной жидкости. Образцы серии 3 представляли собой композиты

с одинаковой объемной долей магнитной жидкости $v_{ff} = 0.350$, но объемная доля «Аэросила» изменялась в следующих пределах $v_{aerosil} = 0.0015 \dots 0.0105$.

Таблица 2.2 – Исследуемые образцы.

Серия 1								
№ образца	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8
v_{ff}	0.000	0.004	0.025	0.065	0.120	0.210	0.315	0.350
$v_{aerosil}$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Серия 2								
№ образца	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8
v_{ff}	0.000	0.004	0.025	0.065	0.120	0.210	0.315	0.350
$v_{aerosil}$	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
Серия 3								
№ образца	3.1	3.2	3.3	3.4				
v_{ff}	0.350	0.350	0.350	0.350				
$v_{aerosil}$	0.0015	0.0035	0.0075	0.0105				

В процессе полимеризации эпоксидной смолы в ней формируются микрокапельные структуры магнитной жидкости. Диаметр капель составляет 10 – 50 мкм (рис. 2.8а). Чем больше магнитной жидкости присутствует в композите, тем больше размер капель и их количество (рис. 2.8б). Превышение порогового значения объемной доли магнитной жидкости порядка 0.2 приводит к появлению ячеистой структуры (рис. 2.8в). По-видимому, при данных объемных долях происходит флокуляция магнитной жидкости в эпоксидной смоле. Возрастание концентрации магнитной жидкости до 0.3 приводит к началу процесса расслоения композита (рис. 2.8г).

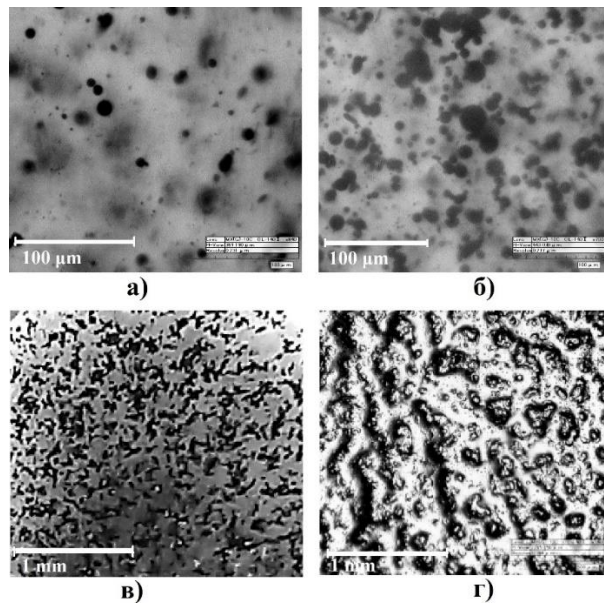


Рисунок 2.8 – Фотографии образцов композита ЭС/МЖ: а) №1.2 - $\nu_{ff} = 0.004$, б) №1.4 - $\nu_{ff} = 0.065$, в) №1.6 - $\nu_{ff} = 0.210$, г) №1.7 - $\nu_{ff} = 0.315$

При ещё более высоких значениях объемных долей магнитной жидкости наблюдается качественное изменение реологических свойств композита. Сразу после смешивания с эпоксидной смолой и отвердителем суспензия по консистенции напоминает крем или гель. Застывший композит при этом теряет прочностные свойства и крошится при незначительных нагрузках.

2.2.2 Математическая модель взаимодействия электромагнитного излучения СВЧ-диапазона с одномерными волноводными фотонными кристаллами, содержащими в качестве нарушения композит эпоксидная смола / магнитная жидкость

Воспользуемся методом матриц передачи [28] для описания распространения электромагнитной волны через периодическую структуру в волноводе прямоугольного сечения. Компоненты напряженности магнитного поля H_j и напряжённости электрического поля E_j в материалах, характеризующихся постоянной распространения γ_j , выводятся из уравнений Максвелла и определяются следующими формулами:

$$E_j = E(x)(A_j e^{-\gamma_j z} + B_j e^{\gamma_j z}), \quad (2.4)$$

$$\begin{aligned}
H_j &= -\gamma_j H(x) (A_j e^{-\gamma_j z} - B_j e^{\gamma_j z}), \\
E_{j+1} &= E(x) (A_{j+1} e^{-\gamma_{j+1} z} + B_{j+1} e^{\gamma_{j+1} z}), \\
H_{j+1} &= -\gamma_{j+1} H(x) (A_{j+1} e^{-\gamma_{j+1} z} - B_{j+1} e^{\gamma_{j+1} z}), \\
\gamma_0^2 &= \frac{\pi^2}{a^2} - \omega^2 \varepsilon_0 \mu_0, \quad \gamma_j^2 = \frac{\pi^2}{a^2} - \omega^2 \varepsilon_0 \mu_0 \varepsilon_j \mu_j,
\end{aligned} \tag{2.5}$$

где j – номер слоя, $z_{j,j+1}$ – координата j -го слоя, отсчитываемая от границы первого слоя структуры, γ_0 – постоянная распространения в вакууме, γ_j постоянная распространения в участке волновода, содержащего слой с номером j , ε_0 и μ_0 – электрическая и магнитная постоянные, ε_j и μ_j – диэлектрическая и магнитная проницаемости материала, располагающегося в j -ом слое периодической структуры, A_j и B_j – коэффициенты, которыми определяются амплитуды падающей и отраженной волны, ω – круговая частота СВЧ-излучения, a – размер широкой стенки волновода. В случае 11-слойной периодической структуры $j = 0..12$. Первый и последний индексы обозначают воздух слева и справа от периодической структуры (рис. 2.7).

Условия непрерывности векторов электрического и магнитного поля выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned}
A_j e^{-\gamma_j z_{j,j+1}} + B_j e^{\gamma_j z_{j,j+1}} &= A_{j+1} e^{-\gamma_{j+1} z_{j,j+1}} + B_{j+1} e^{\gamma_{j+1} z_{j,j+1}}, \\
-\gamma_j A_j e^{-\gamma_j z_{j,j+1}} + \gamma_j B_j e^{\gamma_j z_{j,j+1}} &= -\gamma_{j+1} A_{j+1} e^{-\gamma_{j+1} z_{j,j+1}} + \gamma_{j+1} B_{j+1}.
\end{aligned} \tag{2.6}$$

Компоненты матрицы передачи с учетом (2.6) представимы в следующем виде:

$$\mathbf{T}(z_{j,j+1}) = \begin{pmatrix} \frac{\gamma_{j+1} + \gamma_j}{2\gamma_{j+1}} e^{(\gamma_{j+1} - \gamma_j) z_{j,j+1}} & \frac{\gamma_{j+1} - \gamma_j}{2\gamma_{j+1}} e^{(\gamma_{j+1} + \gamma_j) z_{j,j+1}} \\ \frac{\gamma_{j+1} - \gamma_j}{2\gamma_{j+1}} e^{-(\gamma_{j+1} + \gamma_j) z_{j,j+1}} & \frac{\gamma_{j+1} + \gamma_j}{2\gamma_{j+1}} e^{-(\gamma_{j+1} - \gamma_j) z_{j,j+1}} \end{pmatrix}. \tag{2.7}$$

Тогда коэффициенты A_j , B_j , и A_{j+1} , B_{j+1} можно определить через матрицу передачи (2.7) следующим образом:

$$\begin{pmatrix} A_{j+1} \\ B_{j+1} \end{pmatrix} = \mathbf{T}(z_{j,j+1}) \begin{pmatrix} A_j \\ B_j \end{pmatrix}. \tag{2.8}$$

Приняв во внимание, что A_{N+1} задает амплитуду прошедшей волны через всю периодическую структуру, а B_0 – задает амплитуду отраженной волны, можно установить связь с амплитудой падающей волны A_0 , определяемую выражением:

$$\begin{pmatrix} A_{N+1} \\ 0 \end{pmatrix} = \mathbf{T}_N \begin{pmatrix} A_0 \\ B_0 \end{pmatrix}, \quad (2.9)$$

где

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

- матрица передачи многослойной структуры с количеством слоев $N = 11$.

Соотношение (2.9) позволяет выразить коэффициент отражения $R = B_0/A_0$ следующим образом:

$$R = -\frac{\mathbf{T}_N[2,1]}{\mathbf{T}_N[2,2]}. \quad (2.10)$$

Теоретическое описание взаимодействия электромагнитных волн СВЧ-диапазона с ферромагнитными наночастицами, содержащимися в магнитной жидкости, может быть произведено с использованием теории динамического намагничивания однодоменной частицы. Согласно данной теории на частицу воздействует внутреннее поле анизотропии и внешнее намагничивающее поле [95]. Модель высокочастотной восприимчивости разработана для изотропных частиц магнитной жидкости, в том случае, когда они не взаимодействуют между собой. Такое условие может быть выполнено, например, при низких концентрациях магнитных наночастиц. Теория динамического намагничивания однодоменной частицы может использоваться для расчета параметров магнитных жидкостей с объемной долей твердой фазы порядка 0.15, что экспериментально доказано в работах [160].

Магнитная проницаемость магнитной жидкости μ^* представляет собой комплексную величину:

$$\mu^* = 1 + \chi'_m - i\chi''_m, \quad (2.11)$$

где χ'_m и χ''_m - действительная и мнимая части магнитной восприимчивости, соответственно.

Если ферромагнитные частицы характеризуются низкой магнитной анизотропией, компоненты комплексной восприимчивости (2.11) рассчитываются по формулам:

$$\chi'_m = \frac{\gamma \varphi M_d L(\sigma)}{\omega H_n} \frac{(1+\eta^2)^2 H_n^4 + (\eta^2 - 1) H_n^2}{(1+\eta^2)^2 H_n^4 + 2(\eta^2 - 1) H_n^2 + 1} \quad (2.12)$$

$$\chi''_m = \frac{\gamma \varphi M_d L(\sigma)}{\omega H_n} \frac{\eta H_n^2 (1 + H_n^2 (1 + \eta^2))}{(1+\eta^2)^2 H_n^4 + 2(\eta^2 - 1) H_n^2 + 1} \quad (2.13)$$

$$\eta = \varepsilon \left[\frac{1}{L(\sigma)} - \frac{1}{\sigma} \right], \quad \sigma = \frac{\mu_0 M_d V}{kT} H, \quad (2.14)$$

где γ – гиромагнитное отношение, H_n – приведенное магнитное поле ($H_n = \frac{\gamma H}{\omega}$), $V = \frac{\pi d^3}{6}$ – объём ферромагнитной частицы, φ – объемная доля твердой фазы магнитных частиц, d – размер магнитных частиц, $L(\sigma)$ – функция Ланжевена, ω – круговая частота электромагнитной СВЧ-волны, M_d – намагниченность насыщения магнитных частиц.

Диаметр капель магнитной жидкости в эпоксидной смоле равен нескольким десяткам микрометров. Это на несколько порядков меньше, чем длина волны электромагнитного СВЧ-излучения. В данном случае при расчете постоянной распространения можно использовать приближение эффективной среды, согласно которому композит, содержащий мелкодисперсные включения, представляется в виде материала с эффективными значениями параметров [109].

В настоящей работе предлагается использовать более простую модель, позволяющую избежать вычисления эффективной магнитной проницаемости. Композитный гетерогенный материал, состоящий из эпоксидной смолы и капель магнитной жидкости, предлагается рассматривать как магнитную жидкость без эпоксидной смолы, но с меньшей долей магнитных частиц, пропорциональной объемной доле магнитной жидкости в эпоксидной смоле:

$$\varphi_{comp} = \nu_{ff} \cdot \varphi, \quad (2.15)$$

где φ – объемная доля твердой фазы в магнитной жидкости, ν_{ff} – доля магнитной жидкости в эпоксидной смоле, φ_{comp} – объемная доля магнитных частиц в композите ЭС/МЖ.

Диэлектрическая проницаемость такой «жидкости» совпадает с эффективной диэлектрической проницаемостью композита ε_{comp} , вычисление которой будем производить с использованием формулы Нильсена [81, 127]:

$$\varepsilon_{comp}(v_{ff}) = \varepsilon_{er} \frac{1+A \cdot B(\varepsilon_{ff}) \cdot v_{ff}}{1-B(\varepsilon_{ff}) \cdot \Psi(v_{ff}) \cdot v_{ff}}, \quad (2.16)$$

где

$$B = \frac{\frac{\varepsilon_{ff}-1}{\varepsilon_{er}}}{\frac{\varepsilon_{ff}}{\varepsilon_{er}}+A}, \quad \Psi(v_{ff}) = 1 + \frac{1-PF}{PF^2} \cdot v_{ff}$$

v_{ff} – объемная доля МЖ в ЭС, ε_{er} – диэлектрическая проницаемость ЭС, ε_{ff} – диэлектрическая проницаемость МЖ, PF – предельный объем, который может быть занят наполнителем. Учёт формы включений осуществляется изменением значения параметра A . В случае сферических частиц значение коэффициент A следует задать равным 1.5.

Следует отметить, что выражение Нильсена (2.16) может быть использовано при больших значениях объемных долей включений в диапазоне 0.05...0.35, при которых другие модели эффективных сред, такие как Максвелла-Гарнетта, не дают сходимости с экспериментальными данными.

2.2.3 Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 2.9 изображены спектры коэффициента отражения СВЧ-излучения от периодической структуры, в которой центральный слой был заменен образцом № 1.5. Расчет теоретической частотной зависимости коэффициента отражения (кривая 2) производился по формуле (2.10). Расчет диэлектрической проницаемости композита производился с использованием выражения (2.16). В качестве электрофизических параметров компонент композита и коэффициентов, характеризующих форму включений, задавались следующие значения: $\varepsilon_{er} = 3.2$, $\varepsilon_{ff} = 3.6$, $PF = 0.74$, $A = 1.5$. Магнитная проницаемость вычислялась с использованием формул (2.12) и (2.13) в предположении модели «эффективной объемной доли», согласно которой объемная доля магнитных наночастиц в композите ЭС/МЖ определяется выражением (2.15). Из рисунка можно сделать вывод о хорошем согласовании теории с экспериментом.

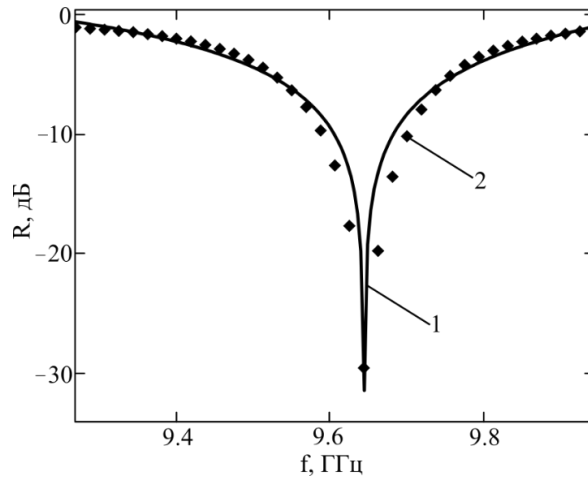


Рисунок 2.9 – Спектр коэффициента отражения СВЧ-излучения от периодической структуры, в которой центральный слой представлял собой образец № 1.5 (содержание объемной доли МЖ в ЭС составляло $\nu_{ff} = 0.12$), величина индукции магнитного поля в области композита равнялась 600 мТл: 1 – спектр, рассчитанный теоретически, 2 – спектр, измеренный экспериментально.

Спектр коэффициент отражения СВЧ-излучения характеризуется наличием резонансного минимума – дефектной моды – в случае измерений, произведенных без магнитного поля (рис. 2.10, кривая 1). Форма дефектной моды начинает изменяться при приложении магнитного поля, а именно наблюдается увеличение коэффициента отражения, минимум становится не столь ярко выраженным (рис. 2.10, кривая 2).

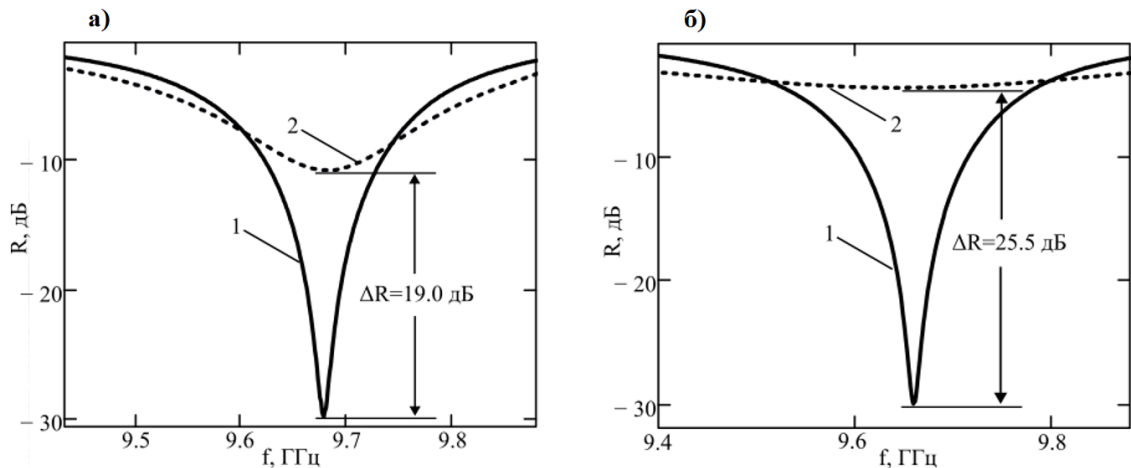


Рисунок 2.10 – Резонансные особенности на спектре коэффициента отражения СВЧ-излучения от периодической структуры. Центральный слой представлял собой образец №1.8 композита ЭС/МЖ с объемной долей МЖ $\nu_{ff} = 0.35$ (а) и образец №2.8 с добавлением $\nu_{aerosil} = 0.010$ объемной доли «Аэросила» (б): 1 – измерения производились без магнитного поля; 2 – величина индукции магнитного поля подбиралась таким образом, чтобы наблюдалось максимальное подавление дефектной моды – 300 мТл (а) и 330 мТл (б).

С ростом величины индукции магнитного поля значение минимума коэффициента отражения начинало увеличиваться вплоть до достижения некоторого предельного значения, при дальнейшем увеличении индукции магнитного поля наблюдалось уменьшение значения минимума, что отображено на рис. 2.11.

Параметр ΔR представляет собой степень подавления дефектной моды и определяется из соотношения:

$$\Delta R(B) = R(B) - R(0), \quad (2.17)$$

где $R(0)$ – величина минимума коэффициента отражения без магнитного поля, $R(B)$ – величина минимума коэффициента отражения при приложении к центральному слою фотонной структуры магнитного поля с индукцией B .

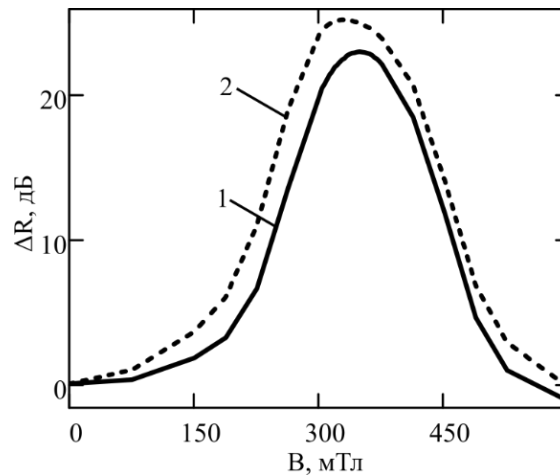


Рисунок 2.11 – Зависимость подавления дефектной моды ΔR от величины индукции магнитного поля. Центральный слой представлял собой образец №1.7 композита ЭС/МЖ с объемной долей МЖ $\nu_{ff} = 0.315$ (кривая 1) и образец №2.7 с добавлением $\nu_{aerosil} = 0.010$ «Аэросила» (кривая 2).

Степень подавления дефектной моды ΔR принимает максимальное значение ΔR_{max} , в зависимости от объемной доли МЖ, при величине индукции магнитного поля B_{Rmax} . На рис. 2.12 (кривая 1) показано, как параметр ΔR_{max} зависит от объемной доли МЖ в композите.

Теоретические расчеты показывают, что при возрастании доли магнитной жидкости ожидается увеличение параметра ΔR_{max} (рис. 2.12, кривая 3). Экспериментальная же кривая 1 на рис. 2.12 достигает максимального значения при объемной доле МЖ $\nu_{ff} = 0.2$, 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. При достаточно больших объемных долях МЖ вязкость эмульсии снижается, в результате происходит образование более крупных структур (рис. 2.8, в, г), которые имеют тенденцию объединяться и распределяться по объему композита неоднородно. Таким образом, значительная часть магнитной жидкости оказывается с торца образца (рис. 2.13, а), вследствие чего эффективность взаимодействия СВЧ-излучения с магнитной жидкостью в композите снижается, т.к. электрическая компонента СВЧ-волны типа TE_{10} в волноводе прямоугольного сечения достигает максимума в центральной его части.

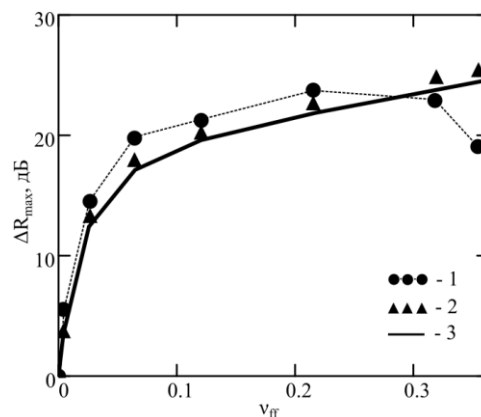


Рисунок 2.12 – Зависимость максимальной степени подавления дефектной моды ΔR_{max} от объёмной доли магнитной жидкости. Центральный слой представлял собой образцы №1.1-1.8 без «Аэросила» (кривая 1) и образцы №2.1-2.8 с добавлением «Аэросила» (кривая 2). Значения, рассчитанные теоретически обозначены кривой 3.

Однородного распределения магнитной жидкости (рис. 2.13, б) можно добиться путем добавления в процессе изготовления композита небольших объемных долей (порядка 0.010) загустителя, например, «Аэросил» (пирогенный диоксид кремния). Столь малые объемные доли не приводят к сколь либо значительным изменениям диэлектрической проницаемости. В результате однородного распределения магнитной жидкости по объему композита падающий участок на рис. 2.12 (кривая 2) исчезает.

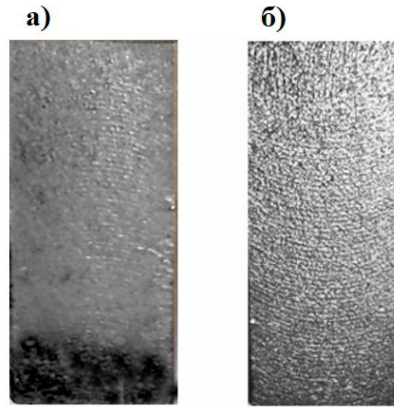


Рисунок 2.13 – Фотографии образцов композита магнитная жидкость – эпоксидная смола с объемной долей магнитной жидкости 0.350: а) образец №1.8 (без «Аэросила»), б) образец №2.8 (с «Аэросилом»).

Чтобы определить оптимальную объемную долю «Аэросила» были исследованы образцы с одинаковой концентрацией магнитной жидкости, но разными объемными долями «Аэросила». На рис. 2.14 приведена зависимость минимума коэффициента отражения $R(B_{Rmax})$, при приложении магнитного поля B_{Rmax} , соответствующего максимальному подавлению дефектной моды, от объемной доли «Аэросила». При увеличении объемной доли «Аэросила» наблюдается возрастание параметра $R(B_{Rmax})$, что может быть объяснено уменьшением седиментации капель МЖ в образцах. Оптимальная объемная доля «Аэросила» составляет 0.01, при больших объемных долях значение $R(B_{Rmax})$ перестает увеличиваться.

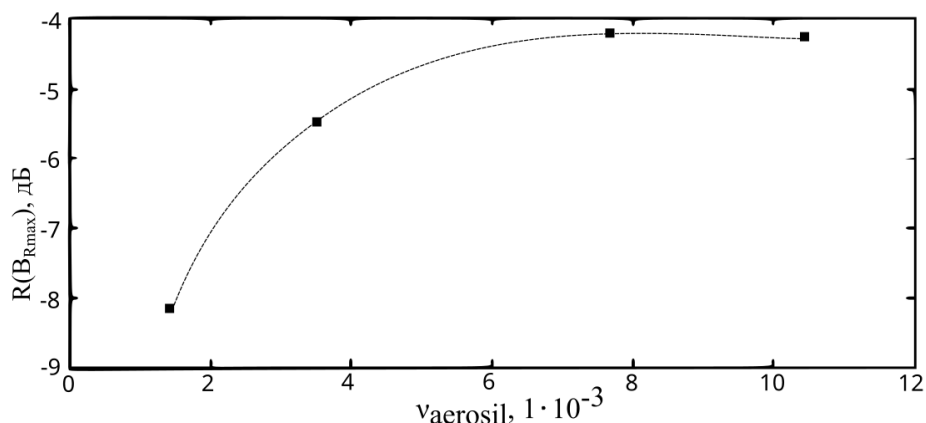


Рисунок 2.14 – Величина минимума коэффициента отражения $R(B_{Rmax})$ при приложении магнитного поля B_{Rmax} , соответствующего максимальному подавлению дефектной моды, в зависимости от объемной доли «Аэросила». Объемная доля магнитной жидкости в композите равнялась 0.350 (образцы №3.1 - 3.4).

Таким образом, была показана возможность управления частотными характеристиками СВЧ фотонного кристалла, при использовании в качестве центрального слоя композита эпоксидная смола - магнитная жидкость, путем приложения к центральному слою магнитного поля с различной величиной индукции. Увеличение индукции магнитного поля приводит к подавлению дефектной моды до предельного значения, дальнейшее увеличение магнитного поля приводит к восстановлению дефектной моды. Такая зависимость объясняется эффективным поглощением мощности СВЧ-излучения магнитными наночастицами при величине индукции магнитного поля, соответствующей условию возникновения ферромагнитного резонанса на частоте дефектной моды. Большие объемные доли магнитной жидкости приводят к её неоднородному распределению по объему композита, что снижает величину подавления. Добиться однородного заполнения и увеличения подавления дефектной моды позволяет добавление загустителя на этапе изготовления композита.

3 ИЗМЕРЕНИЕ СТЕПЕНИ АНИЗОТРОПИИ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОМПОЗИТА ЭПОКСИДНАЯ СМОЛА/МАГНИТНАЯ ЖИДКОСТЬ/УГЛЕРОДНЫЕ НАНОТРУБКИ

Для исследования поверхности и объема материалов на наличие различного рода дефектов перспективным является использование бесконтактных электромагнитных методов. Суть таких методов заключается в том, что внутри материала индуцируются магнитные поля и электрические токи, вывод о состоянии поверхности производится в ходе анализа электромагнитного отклика. К бесконтактным методам относятся СВЧ-методы [161], область применения которых достаточно обширна: от измерения диэлектрической проницаемости анизотропных поверхностей [162] до исследования параметров наноразмерных структур, например, нанотрубок [163] и агломератов ферромагнитных наночастиц [164-166].

Эпоксидная смола широко применяется в различных областях науки и техники от космической промышленности до микроэлектроники и является перспективным материалом для использования в качестве матрицы композитных материалов. Добавление нановключений в эпоксидную смолу позволяет управлять параметрами композита и получать материалы с заданными характеристиками. Использование в качестве включений углеродных нанотрубок позволяет в широких пределах управлять механическими и электрофизическими свойствами композитов [23, 24]. Композиты, содержащие ориентированные УНТ, обладают более высокой электропроводностью в направлении выравнивания УНТ, чем перпендикулярно ему. Работа [89] посвящена изучению анизотропии электропроводности магнитных композитов, содержащих УНТ.

В настоящей работе [36, 45, 46] исследуется композит эпоксидная смола – магнитная жидкость – углеродные нанотрубки (ЭС/МЖ/УНТ). Полимеризация композита производилась в магнитном поле с различной величиной и ориентацией вектора индукции. Массовая доля УНТ изменялась в диапазоне 0.01-0.35 мас.%. При анализе экспериментальных данных учитывалась анизотропия электрофизических параметров вытянутых структур, состоящих из магнитных

наночастиц и УНТ. Измерения производились волноводными методами в сантиметровом диапазоне длин волн.

3.1 Исследуемые образцы

Для приготовления композитного материала ЭС/МЖ/УНТ предварительно было подготовлено два компонента:

- компонент *A* (МЖ/УНТ) – представлял собой магнитную жидкость с диспергированными в ней многостенными углеродными нанотрубками серии «Таунит-М»,
- компонент *B* (ЭС) – представлял собой смесь эпоксидной смолы с отвердителем.

Процесс изготовления композитов состоял из следующих стадий:

1. *Приготовление компонента A.* Осуществлялось механическое перемешивание магнитной жидкости массой m_{ff} с УНТ массой m_{cnt} . Для предотвращения агрегации УНТ суспензия подвергалась ультразвуковому воздействию в ультразвуковой ванне. Магнитная жидкость представляла собой коллоидный раствор магнетитовых наночастиц диаметром 10 нм в керосине, в качестве стабилизатора использовалась олеиновая кислота. Объемная доля магнитных наночастиц составляла 0.14.
2. *Смешивание компонентов.* Осуществлялось перемешивание механическим способом компонента *A* (МЖ/УНТ) массой m_A , с компонентом *B* (ЭС) массой m_B .
3. *Заливка.* Суспензия ЭС/МЖ/УНТ заливалась в две силиконовые формы. Полимеризация суспензии в первой форме осуществлялась в магнитном поле, создаваемом постоянными магнитами. Полимеризация суспензии во второй форме происходила в отсутствии магнитного поля. Спустя сутки образцы извлекались из форм, торец подвергался механической обработке с целью достичь необходимой длины образца.

Готовые образцы представляли собой параллелепипеды, состоящие из композита ЭС/МЖ/УНТ. Размер образцов составлял 23x10x4 мм. Магнитное поле приводит к возникновению вытянутых нитевидных структур в объеме композита, состоящих из МЖ и УНТ (рис. 3.1). Нити ориентированы в том же направлении, что и вектор индукции магнитного поля, при котором происходила полимеризация образцов. Анализ фотографий, полученных с оптического микроскопа, показал, что средняя толщина таких структур равняется 150 мкм.

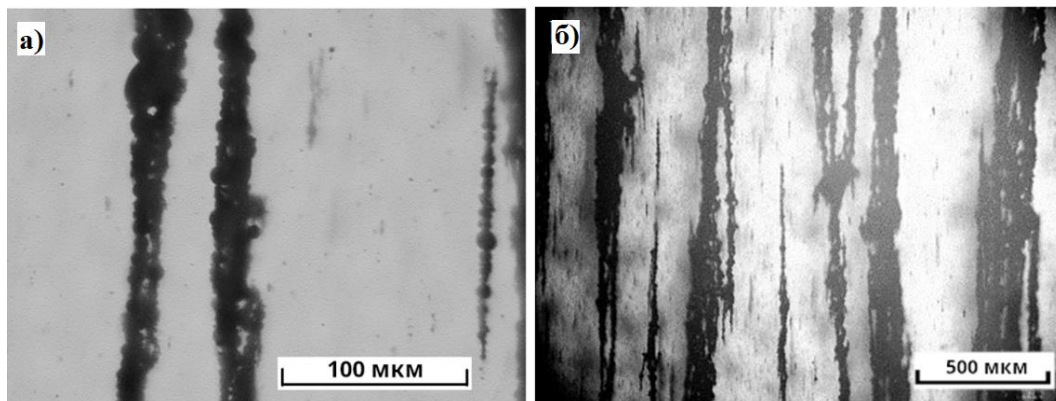


Рисунок 3.1 – Ориентированные цепочечные агрегаты (а) капле МЖ и нитевидные структуры (б), состоящие из МЖ и УНТ, возникающие при полимеризации композита в магнитном поле (образец из Set A). Фото получено с оптического микроскопа HIROX KH-7700 (Япония).

Концентрация компонентов в композитах и условия при которых изготавливались образцы сведены в табл. 3.1. Для удобства образцы сгруппированы в четыре набора. В таблице используются следующие обозначения: c_{m_A} – массовая доля компонента А, $c_{m_{cnt}}$ – соответствующая ей массовая доля УНТ в готовом композите ЭС/МЖ/УНТ, m_{cnt}/m_{magn} – отношение массы УНТ к массе магнитных наночастиц магнитной жидкости, B – величина индукции магнитного поля при котором происходила полимеризация. Значения, изменяемые в наборе, обозначены курсивом. При полимеризации композитов магнитное поле направлялось таким образом, чтобы при размещении образца в волноводе электрическая компонента СВЧ-волны была ориентирована параллельно нитевидным структурам, образуемым в композите. Исключение составляет набор *Set A*, где изменялось направление вектора индукции магнитного поля при прочих равных параметрах.

Таблица 3.1 – Массовые доли компонентов в композите, величина и направление вектора индукции магнитного поля, при которых изготавливались образцы.

Набор	B , направление	B , мТл	c_{m_A} , %	c_{m_cnt} , %	m_{cnt} / m_{magn} ,
Set A	, //, ⊥	130	2.7	0.053	0.14
Set B		20...1200	2.7	0.053	0.14
Set C		130	1.0...18.0	0.01...0.345	0.14
Set D		130	2.7	0.053	0.035..0.7

Каждый набор позволяет исследовать влияние на параметры композита следующих факторов:

Set A – направления магнитного поля,

Set B – величины индукции магнитного поля,

Set C – массовой доли компонента А (суспензии МЖ/УНТ) в образцах,

Set D – отношения массы УНТ к массе МЖ в компоненте А.

3.2 Проведение эксперимента

Измерения спектров коэффициента отражения СВЧ-излучения осуществлялось по методике и на оборудовании, описанными в разделе 2.2. В качестве исследуемой структуры использовался фотонный кристалл с теми же параметрами, исследуемый образец располагался в центральном слое и представлял собой нарушение периодичности фотонной структуры.

Для определения комплексной диэлектрической проницаемости включений из УНТ в составе композита требуется знание эффективной плотности самих включений. Объемная доля УНТ задается следующим выражением:

$$v_{cnt} = \frac{V_{cnt}}{V_{epox} + V_{cnt}} = \frac{m_{cnt}/\rho_{cnt}}{m_{epox}/\rho_{epox} + m_{cnt}/\rho_{cnt}}, \quad (3.1)$$

где V_{cnt} – объем УНТ в композите, V_{epox} – объем эпоксидной смолы с отвердителем.

Из (3.1) получим:

$$\rho_{cnt} = \frac{m_{cnt}\rho_{epox}}{m_{epox}} \frac{1-v_{cnt}}{v_{cnt}}. \quad (3.2)$$

Таким образом, для вычисления плотности УНТ ρ_{cnt} требуется знание их объемной доли ν_{cnt} , которая может быть вычислена в результате обработки фотографий композита. Для этой цели был изготовлен тонкий образец толщиной 850 мкм, представляющий собой эпоксидную смолу с УНТ без магнитной жидкости (рис. 3.2, а). Цифровая обработка фотографий осуществлялась в программе ImageJ. Бинаризация изображений (рис. 3.2, б) позволила определить площадь около 5700 включений, которые состояли из углеродных нанотрубок и обладали различной формой. Объем включений производился в предположении сферической формы. Для этого по бинаризованному изображению определялась площадь включения S_{cnt} . Эффективный радиус, который использовался при вычислении эффективного объема включения V_{cnt_i} , находился из формулы $S_{\text{cnt}} = \pi R_{\text{eff}}^2$. Суммарный объем всех включений позволяет оценить общий эффективный объем УНТ в композите: $V_{\text{cnt}} = \sum_i V_{\text{cnt}_i}$.

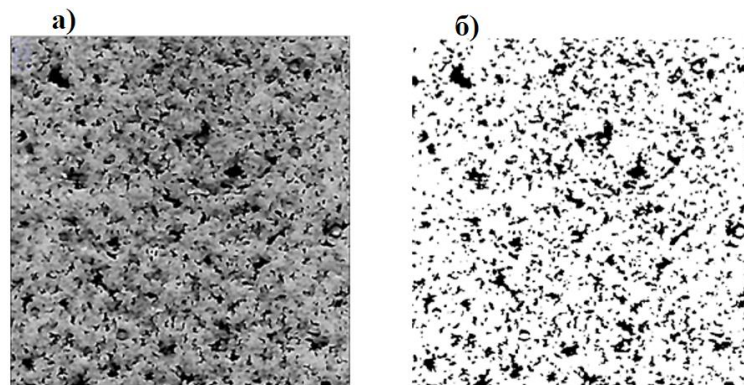


Рисунок 3.2 – Участок фотографии образца до (а) и после бинаризации (б).

Объемная доля включений из УНТ, вычисленная с использованием выражения (3.1), составила:

$$\nu_{\text{cnt}} = 0.013$$

Подстановка в формулу (3.2) значений ($m_{\text{cnt}} = 0.01$ г, $m_{\text{epox}} = 9.00$ г, $\rho_{\text{epox}} = 1180$ кг/м³, $\nu_{\text{cnt}} = 0.013$), используемых при изготовлении образца, позволила определить эффективную плотность включений из УНТ, которая составила $\rho_{\text{cnt_eff}} = 98.64$. Насыпная плотность УНТ серии «Таунит-М», имеющаяся в справочных данных, составляет 25-60 кг/м³, и меньше рассчитанной эффективной плотности. Это может быть обусловлено влиянием эпоксидной

смолы, которая, вероятно, приводит к возникновению более плотных структур из УНТ.

Теперь не составляет труда вычислить объемную долю включений $V_{\text{cnt_in_comp}}$, состоящих из УНТ, в композите ЭС/МЖ/УНТ, поскольку плотность УНТ известна, а их масса может быть измерена.

3.3 Анализ экспериментальных данных

3.3.1 Влияние направления индукции магнитного поля, при котором происходила полимеризация композитов

Спектр коэффициента отражения СВЧ-излучения от периодической структуры с нарушением содержит резонансный минимум на частоте, соответствующей возникновению дефектной моды (рис. 3.3). Частота и величина минимума зависит от электрофизических и геометрических параметров нарушения, в качестве которого выступает исследуемый образец в форме параллелепипеда.

Если в центральный слой фотонного кристалла поместить образец, полимеризация которого происходила в магнитном поле с вектором индукции, направленным параллельно электрическому вектору СВЧ-волны типа TE_{10} , распространяющейся в прямоугольном волноводе, то наблюдается изменение положения минимума коэффициента отражения (рис. 3.3, кривая 2), относительно образца, полимеризация которого происходила в отсутствие магнитного поля (рис. 3.3, кривая 1). Частота минимума сдвигается в область низких частот, а дефектная мода подавляется, что проявляется в увеличении значения минимума на частотной зависимости коэффициента отражения. Такое смещение может быть объяснено наличием вытянутых ориентированных нитевидных структур, состоящих из магнетитовых наночастиц и УНТ, возникающих при полимеризации композита в магнитном поле, 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. 3.3, кривая 3, 4).

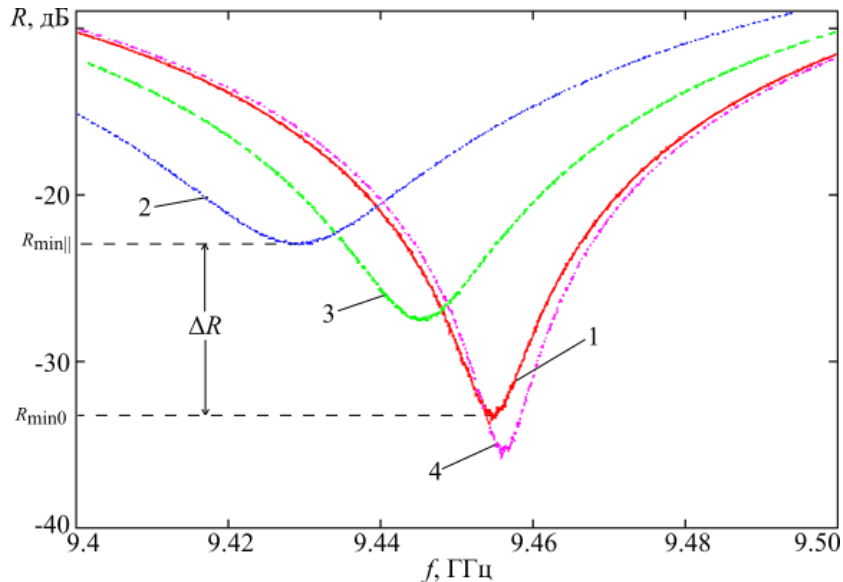


Рисунок 3.3 – Спектр коэффициента отражения СВЧ-излучения от фотонной структуры с нарушенным центральным слоем, в котором размещались образцы из набора *Set A*, содержащие структуры с различной ориентацией: 1 – образцы, полимеризация которых происходила без магнитного поля, содержащие неориентированные структуры из УНТ неправильной формы, 2 – нитевидные структуры, ориентированные под углом 0° относительно электрического вектора СВЧ-волны, 3 – 45° , 4 – 90° .

Параметр $\Delta R = R_{\min||} - R_0$ в дальнейшем будет использоваться для оценки влияния образующихся в магнитном поле ориентированных нитевидных структур на анизотропию электрофизических свойств композитов. Параметр ΔR представляет собой разность между величиной минимума коэффициента отражения $R_{\min||}$ от фотонной структуры с образцом, содержащим нитевидные структуры, ориентированные в направлении электрического вектора СВЧ-волны, и образцом, изготовленным в отсутствие магнитного поля R_0 , содержащим неориентированные структуры неправильной формы.

Наиболее эффективное взаимодействие СВЧ-волны с нитевидными структурами происходит при совпадении направления нитей с электрическим вектором СВЧ-волны. В связи с этим целесообразно производить исследование

влияния концентрации УНТ и магнитной жидкости на электрофизические параметры композитов ЭС/МЖ/УНТ на примере образцов, изготовленных при приложении магнитного поля в соответствующем направлении.

Дополнительно были произведены измерения спектров коэффициентов отражения от фотонной структуры при размещении в ней в качестве нарушенного слоя образцов, представляющих собой композит ЭС/МЖ (без УНТ) и ЭС/МЖ/Гр, содержащий вместо углеродных нанотрубок мелкодисперсные частицы графита. Концентрация графита и магнитной жидкости в представленных композитах совпадала с концентрацией в образцах, частотные характеристики которых представлены на рис. 3.3. Самой высокой степенью анизотропии отражательных свойств обладают образцы, состоящие из композита ЭС/МЖ/УНТ (рис. 3.4). Столь сильная степень анизотропии может быть обусловлена наличием в такого рода композитах ориентированных проводящих нитей, обладающих анизотропией электропроводности, связанной с анизотропией электрофизических свойств самих УНТ и эффектами структурной организации при выравнивании в магнитном поле.

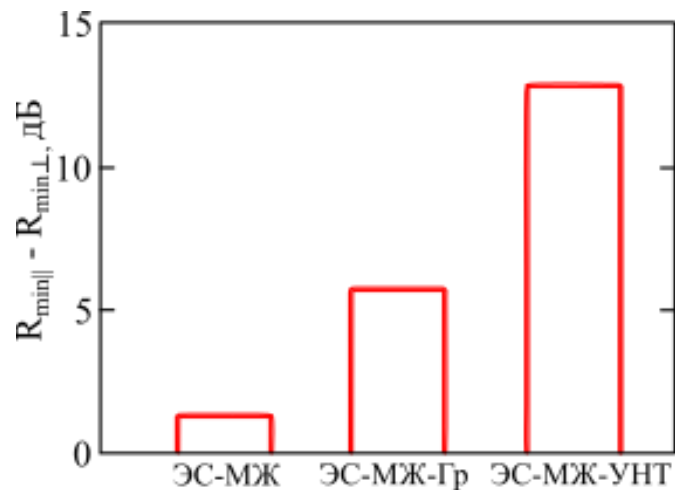


Рисунок 3.4 – Степень анизотропии отражательных свойств композитов различного состава, определяемая как разность минимальных значений коэффициентов отражения от фотонной структуры, при размещении в центральном слое образцов с взаимно перпендикулярной ориентацией нитевидных структур.

Далее будем пренебрегать влиянием магнетитовых наночастиц, поскольку нити из чистой магнитной жидкости оказывают слабое воздействие (рис. 3.4) на величину минимума коэффициента отражения от периодической фотонной структуры.

3.3.2 Влияние величины индукции магнитного поля, при котором происходила полимеризация композитов

Возрастание величины индукции магнитного поля, при котором происходила полимеризация образцов приводит к тому, что минимум коэффициента отражения стремительно увеличивается (рис. 3.5). Такой рост объясняется тем, что ориентированные нитевидные структуры МЖ/УНТ в эпоксидной смоле начинают возникать при малых значениях величины индукции магнитного поля более 5 мТл. Полимеризация образцов при дальнейшем росте величины индукции магнитного поля в диапазоне 100-500 мТл слабо влияет на изменение параметров образцов, что может свидетельствовать о выходе процесса структурообразования на насыщение. Увеличение коэффициента отражения от образцов, полимеризация которых происходила в магнитных полях с индукцией свыше 600 мТл, обусловлено возникновением от постоянных магнитов неоднородного магнитного поля и стягиванием суспензии МЖ/УНТ в область концентрации магнитных силовых линий таким образом, что её значительная часть оказывается сосредоточена ближе к центру образца. Электрическое поле СВЧ-волны типа TE_{10} в прямоугольном волноводе максимально в центральной его части, что обуславливает более сильное влияние ориентированных структур на величину коэффициента отражения СВЧ-излучения.

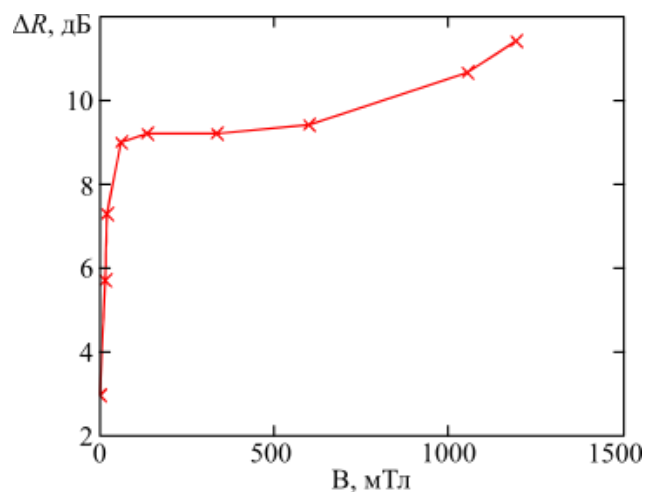


Рисунок 3.5 – Влияние величины индукции магнитного поля, при котором происходила полимеризация композита, на величину минимума коэффициента отражения от периодической структуры, в которой в качестве нарушения используется исследуемый образец из набора *Set B*.

Полимеризация образцов из наборов *Set C* и *Set D* происходила при величине индукции магнитного поля равным 130 мТл.

3.3.3 Влияние объемной доли суспензии магнитная жидкость – углеродные нанотрубки

Электропроводность композитов ЭС/МЖ/УНТ из набора *Set C* увеличивается при возрастании концентрации c_{m_A} компонента *A*, представляющего собой суспензию МЖ/УНТ, что способствует росту коэффициента отражения (рис. 3.6, а, кривая 1). Концентрация углеродных нанотрубок в компоненте *A* равнялась 2.0 мас.% во всех образцах набора *Set C*.

Снижение коэффициента отражения (рис. 3.6, а, кривая 2) вероятно обусловлено тем, что вытянутые нити образуются не столь интенсивно при большой массовой доле компонента *A* ($c_{m_A} > 12$ мас. %), что скорее всего связано с изменением реологических свойств композита на этапе изготовления. При высокой массовой доле компонента *A* происходит уменьшение анизотропии электрофизических параметров композита, что видно из рис. 3.6, б, на котором показана разность кривой 2 и кривой 1, изображенных на рис. 3.6, а.

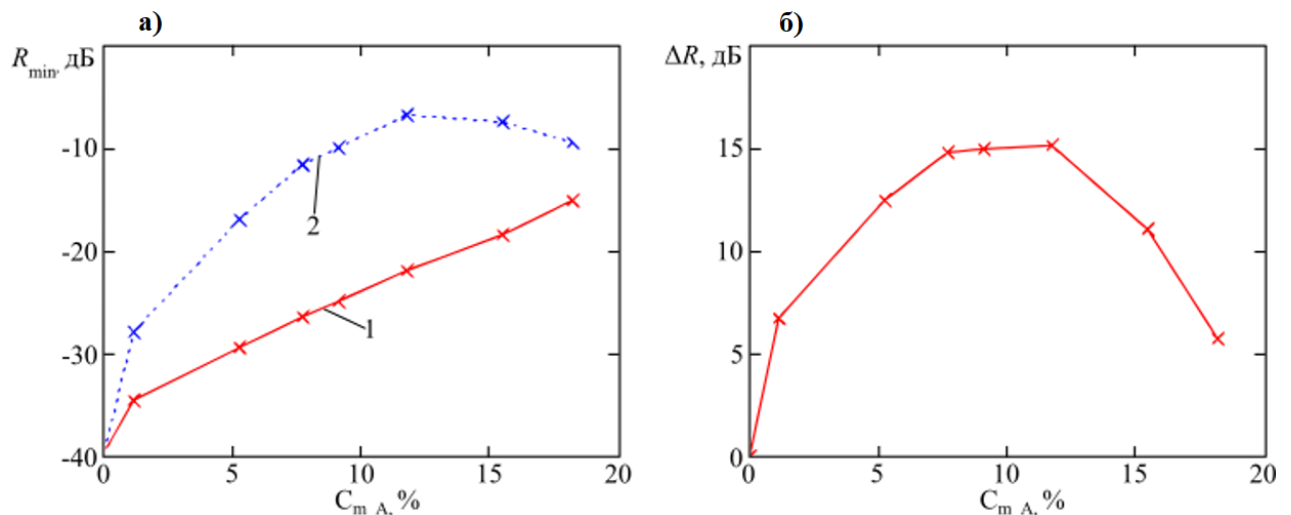


Рисунок 3.6 – Влияние массовой доли компонента *A* в образцах из набора *Set C* на: а) величину минимума коэффициента отражения: 1 – изготовление композитов происходило в отсутствии магнитного поля, 2 – изготовление композитов происходило в магнитном поле с величиной индукции равной 130 мТл, б) разность минимумов коэффициентов отражения от образцов, полимеризация которых происходила в присутствии и в отсутствии магнитного поля.

3.3.4 Влияние отношения массы углеродных нанотрубок к массе магнитной жидкости

Электропроводность композитов ЭС/МЖ/УНТ из набора *Set D* увеличивается при возрастании концентрации УНТ (отношения m_{cnt}/m_{magn}) в компоненте *A* (МЖ/УНТ). Это способствует росту коэффициента отражения от периодической структуры при использовании в качестве нарушения образцов, изготовленных как в отсутствии магнитного поля (рис. 3.7, а, кривая 1), так и при величине индукции равным 130 мТл (рис. 3.7, а, кривая 2). Концентрация компонента *A* в образцах из набора *Set D* составляла 2.7 мас. %.

Область плато на рис. 3.7, а, кривая 2 связана с тем, что структурообразование достигает насыщения с возрастанием массовой доли УНТ в компоненте *A*. Насыщение обусловлено наличием некоторой доли УНТ, которая не участвует в образовании вытянутых ориентированных нитей при приложении магнитного поля. В тоже самое время эти УНТ приводят к возрастанию электропроводности композитов, изготовленных в отсутствии магнитного поля, чем обусловлен спад ΔR на (рис. 3.7, б) при больших массовых долях УНТ.

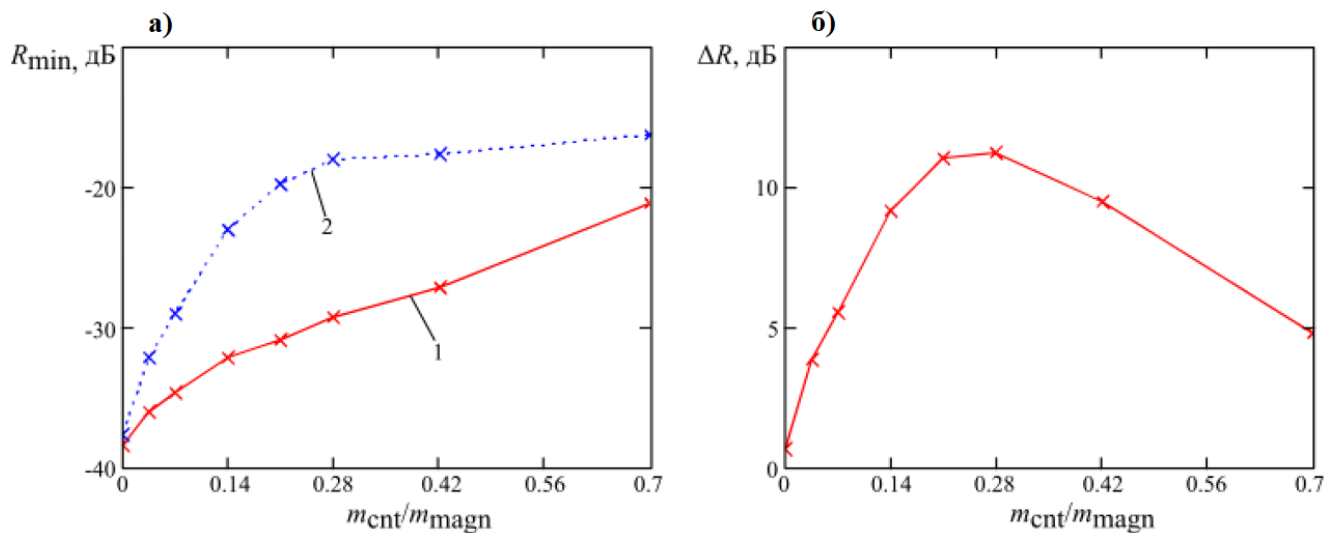


Рисунок 3.7. – Влияние концентрации УНТ в компоненте *A* в образцах из набора *Set D* на: а) величину минимума коэффициента отражения: 1 – изготовление композитов происходило в отсутствии магнитного поля, 2 – изготовление композитов происходило в магнитном поле с величиной индукции равной 130 мТл, б) разность значений кривой 2 и кривой 1.

Анизотропия электрофизических параметров уменьшается при большом отношении m_{cnt}/m_{magn} , поэтому при изготовлении образцов в других наборах отношение равнялось $m_{cnt}/m_{magn} = 0.14$. При таком значении большая доля УНТ участвует в образовании вытянутых ориентированных нитей.

3.4 Моделирование фотонной структуры и расчет степени анизотропии комплексной диэлектрической проницаемости композитов

Описание распространения электромагнитной волны СВЧ-диапазона через фотонную структуру может быть осуществлено с использованием аппарата матриц передачи. Данный метод описывался ранее, в разделе 2.2. Положение дефектной моды на спектре коэффициента отражения зависит от комплексной диэлектрической проницаемости нарушенного слоя $\varepsilon' - i\varepsilon''$. Действительная часть диэлектрической проницаемости ε' влияет преимущественно на частоту дефектной моды, а на величину минимума коэффициента отражения оказывает влияние мнимая часть ε'' , которая обуславливает потери мощности СВЧ-излучения в композите.

Основной вклад в диэлектрическую проницаемость композита вносят включения из УНТ, поскольку ЭС и МЖ обладают схожими значениями диэлектрической проницаемости. В дальнейших расчетах, пренебрегая влиянием магнитной жидкости, примем, что диэлектрическая проницаемость композита зависит только от электрофизических параметров матрицы и УНТ.

Диэлектрическая проницаемость включений из УНТ может быть определена в случае, если известна эффективная диэлектрическая проницаемость композита ε_{comp0} , с использованием формулы Максвелла-Гарнетта [167]:

$$\varepsilon_{comp0} = \frac{1 + 2\nu_{cnt_in_comp} \frac{\varepsilon_{cnt} - \varepsilon_B}{2\varepsilon_B + \varepsilon_{cnt}}}{1 - \nu_{cnt_in_comp} \frac{\varepsilon_{cnt} - \varepsilon_B}{2\varepsilon_B + \varepsilon_{cnt}}}, \quad (3.3)$$

где ε_B и ε_{cnt} – диэлектрическая проницаемость матрицы (компонент B , представляющий собой ЭС с отвердителем) и включений из УНТ, $\nu_{cnt_in_comp}$ – объемная доля УНТ в образце, определяемая формулой:

$$v_{\text{cnt_in_comp}} = v_{\text{cnt_in_A}} \cdot v_{\text{A_in_comp}}, \quad (3.4)$$

где $v_{\text{cnt_in_A}}$ – объемная доля УНТ в компоненте A , $v_{\text{A_in_comp}}$ – объемная доля компонента A в итоговом композите ЭС/МЖ/УНТ:

$$v_{\text{cnt_in_A}} = \frac{m_{\text{cnt}}/\rho_{\text{cnt}}}{m_{\text{ff}}/\rho_{\text{ff}}+m_{\text{cnt}}/\rho_{\text{cnt}}} = \frac{m_{\text{cnt}}\rho_{\text{ff}}}{m_{\text{ff}}\rho_{\text{cnt}}+m_{\text{cnt}}\rho_{\text{ff}}}, \quad (3.5)$$

$$v_{\text{A_in_comp}} = \frac{m_{\text{A}}\rho_{\text{B}}}{m_{\text{A}}\rho_{\text{B}}+m_{\text{B}}\rho_{\text{A}}}. \quad (3.6)$$

Из следующего равенства может быть выражена плотность ρ_{A} компонента A (МЖ/УНТ):

$$m_{\text{A}} = m_{\text{ff}} + m_{\text{cnt}} = \rho_{\text{A}}(V_{\text{ff}} + V_{\text{cnt}}),$$

$$\rho_{\text{A}} = \frac{m_{\text{ff}}+m_{\text{cnt}}}{(V_{\text{ff}}+V_{\text{cnt}})},$$

Выразив объем через массу, получим соотношение:

$$\rho_{\text{A}} = \frac{m_{\text{ff}}+m_{\text{cnt}}}{(m_{\text{ff}}/\rho_{\text{ff}}+m_{\text{cnt}}/\rho_{\text{cnt}})} = \rho_{\text{ff}}\rho_{\text{cnt}} \frac{m_{\text{ff}}+m_{\text{cnt}}}{m_{\text{ff}}\rho_{\text{cnt}}+m_{\text{cnt}}\rho_{\text{ff}}}. \quad (3.7)$$

Выражение, позволяющее рассчитать объемную УНТ, можно вывести, произведя подстановку (3.7) в (3.6) и (3.5-3.6) в (3.4):

$$v_{\text{cnt_in_comp}} = \frac{m_{\text{cnt}}m_{\text{A}}\rho_{\text{ff}}\rho_{\text{B}}}{m_{\text{A}}\rho_{\text{B}}\cdot(m_{\text{ff}}\rho_{\text{cnt}}+m_{\text{cnt}}\rho_{\text{ff}})+m_{\text{B}}\rho_{\text{ff}}\rho_{\text{cnt}}\cdot(m_{\text{ff}}+m_{\text{cnt}})}, \quad (3.8)$$

где m_{cnt} и m_{ff} – масса УНТ и МЖ при изготовлении компонента A , m_{A} и m_{B} – масса компонента A и B в итоговом композите, ρ_{ff} , ρ_{cnt} , ρ_{B} – плотности МЖ, УНТ и ЭС.

Определение диэлектрической проницаемости образцов осуществлялось по спектру коэффициента отражения СВЧ-излучения от фотонной структуры, в которой в качестве центрального слоя располагается исследуемый композит, в результате решения обратной задачи. Численными методами находятся такие значения компонент ε' и ε'' комплексной диэлектрической проницаемости, при которых теоретически рассчитанный минимум коэффициента отражения с использованием выражения (2.10) совпадает с минимумом коэффициента отражения, измеренным экспериментально.

С использованием измеренных частотных зависимостей коэффициента отражения (рис. 3.3) была определена диэлектрическая проницаемость образцов из набора *Set A* (табл. 3.2), изготовление которых происходило при различных

направлениях вектора индукции магнитного поля $\epsilon_{\text{comp}\parallel}$, $\epsilon_{\text{comp}\//}$, $\epsilon_{\text{comp}\perp}$, а также в отсутствии магнитного поля $\epsilon_{\text{comp}0}$. Также была определена комплексная диэлектрическая проницаемость чистой эпоксидной смолы, которая составила $\epsilon_{\text{epox}} = 3.2 - 0.015i$.

Вычисление электропроводности композита на сверхвысоких частотах может быть определено из выражения для мнимой части диэлектрической проницаемости:

$$\epsilon''_{\text{comp}} = \frac{\sigma_{\text{comp}}}{\epsilon_0 \omega},$$

где σ_{comp} – электропроводность композита, ϵ_0 – электрическая постоянная, ω – круговая частота СВЧ-излучения.

Таблица 3.2 – Электрофизические параметры образцов, изготовленных при различной ориентации вектора индукции магнитного поля

	ϵ'	ϵ''	$\sigma, \Omega^{-1}m^{-1}$
$\epsilon_{\text{comp}0}$	3.23	0.03	0.01
$\epsilon_{\text{comp}\parallel}$	3.51	0.09	0.05
$\epsilon_{\text{comp}\//}$	3.32	0.05	0.03
$\epsilon_{\text{comp}\perp}$	3.21	0.02	0.01

Комплексная диэлектрическая проницаемость увеличивается для тех композитов, у которых нитевидные структуры сонаправлены с электрическим вектором СВЧ-волны. В композитах, у которых нити ориентированы ортогонально электрическому вектору СВЧ-волны, наблюдается уменьшение действительной и мнимой части диэлектрической проницаемости.

Исследование влияния композитов с ориентированными нитями на спектр коэффициента отражения СВЧ-излучения от фотонной структуры осуществлялось в программе электродинамического 3D-моделирования Ansys HFSS (High Frequency Structure Simulator), широко используемой при моделировании работы СВЧ-устройств [168]. Было произведено моделирование (рис. 3.8) периодической

структуры, представленной на рис. 2.7, в которой центральный слой заменялся исследуемым композитом из набора *Set A*. Сперва в модели использовался композит, при изготовлении которого вектор индукции магнитного поля ориентировался в направлении, соответствующем электрическому вектору СВЧ-волны, распространяющейся в волноводе.

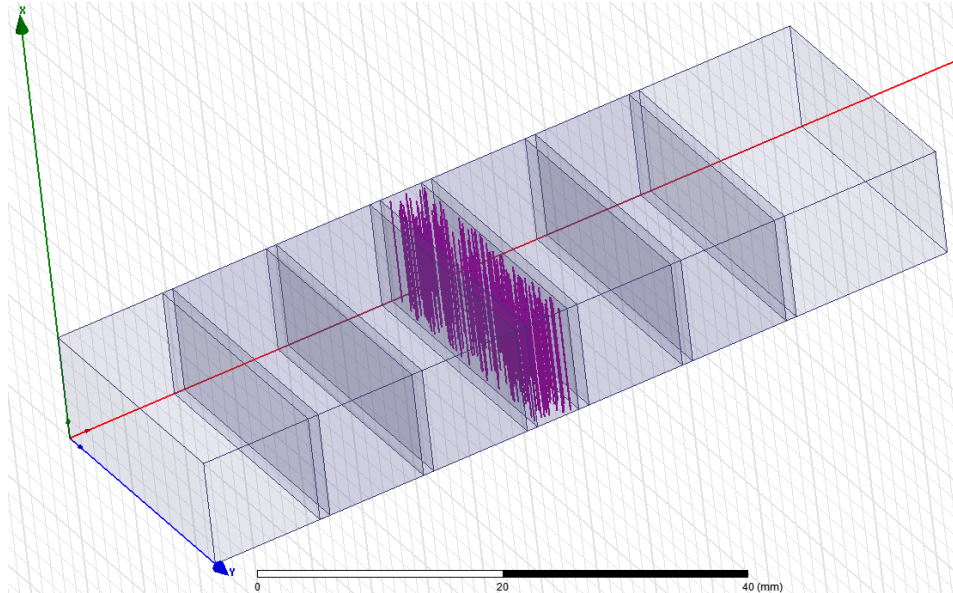


Рисунок 3.8 – Моделирование в HFSS фотонного кристалла с нарушением в виде исследуемого образца, содержащего ориентированные нити из УНТ.

Композит, исследуемый в модели представлял собой образец в форме параллелепипеда из эпоксидной смолы, в которой по равномерному случайному распределению был разбросан «лес» из ориентированных нитей, представляющих собой структуры в форме параллелепипеда.

В ходе статистического анализа изображений (рис. 3.1), полученных с оптического микроскопа, определялась ширина нитей, состоящих из МЖ и УНТ. Поскольку в расчетах было принято решение пренебречь наличием МЖ, в эту ширину необходимо внести поправку. Поправка определялась из того факта, что объём УНТ в пять раз меньше объема магнитной жидкости. Следовательно объём агломерата V_{agl} можно записать в следующем виде:

$$V_{agl} = V_{ff} + V_{cnt} = 5 \cdot V_{cnt} + V_{cnt} = 6 \cdot V_{cnt}, \quad (3.9)$$

$$V_{cnt} = d_{cnt}^2 \cdot h, \quad V_{agl} = d^2 h, \quad (3.10)$$

где d_{cnt} – искомая эффективная ширина нити из УНТ, d – определенная по изображениям с оптического микроскопа толщина структуры из МЖ/УНТ, h – длина нити, равная высоте узкой стенки волновода.

Эффективная ширина нитей, состоящих из УНТ, определенная из выражений (3.9-3.10), оказалась в 2.5 раза меньше, ширины нитей, состоящих из МЖ/УНТ, определенной в результате анализа изображений с оптического микроскопа:

$$d_{\text{cnt}} = \sqrt{\frac{1}{6}} d \approx 0.4d \quad (3.11)$$

В 3D-модели число нитей соответствовало объемной доле УНТ в композите ЭС/МЖ/УНТ, которая определялась по формуле (3.8) и составила $\nu_{\text{cnt_in_comp}} = 0.65\%$. При расчетах в качестве плотности УНТ использовалось эффективное значение $\rho_{\text{cnt}} = \rho_{\text{cnt_eff}} = 98.64$, найденное экспериментально в результате анализа бинаризованного изображения тонкого слоя эпоксидной смолы, содержащей УНТ без МЖ.

Изначально при моделировании предполагалось, что комплексная диэлектрическая проницаемость нитей и неориентированных включений из УНТ неправильной формы $\varepsilon_{\text{cnt0}}$ совпадают. Расчет значения $\varepsilon_{\text{cnt0}}$ осуществлялся с помощью выражения (3.3). При этом использовалось найденное экспериментально значение диэлектрической проницаемости композита $\varepsilon_{\text{comp0}}$ (табл. 3.2), изготовленного в отсутствие магнитного поля. Минимум на теоретической частотной зависимости коэффициента отражения (рис. 3.9, а, кривая 3) сильно смещен от экспериментального минимума (рис. 3.9, а, кривая 2), как по частоте, так и по величине. Такое смещение объясняется тем, что электрофизические параметры нитевидных структур отличаются от параметров включений неправильной формы, состоящих из УНТ.

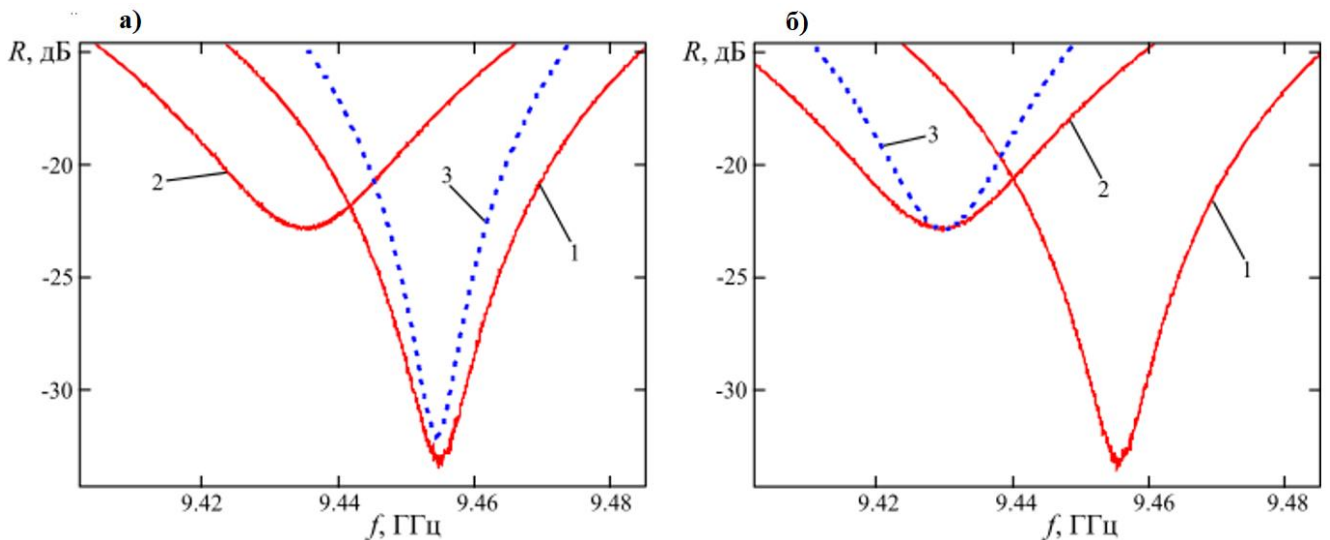


Рисунок 3.9 – Частотные зависимости коэффициента отражения СВЧ-излучения, измеренные экспериментально и полученные, в результате моделирования в HFSS: 1 – экспериментальный спектр, образец изготовлен в отсутствии магнитного поля, 2 – экспериментальный спектр, образец изготовлен в магнитном поле с вектором индукции, ориентированном параллельно электрическому вектору СВЧ-волны, 3 – теоретическая частотная зависимость, полученная в результате моделирования в программе HFSS, при этом значение комплексной диэлектрической проницаемости нитей из УНТ равнялось: а) значению $\epsilon_{\text{cnt}0}$ для включений неправильной формы, б) значению $\epsilon_{\text{cnt}\parallel}$, определённое теоретически численными методами с использованием программы HFSS.

Диэлектрическая проницаемость нитей в ортогональных направлениях $\epsilon_{\text{cnt}\parallel}$ и $\epsilon_{\text{cnt}\perp}$ (табл. 3.3) определялась с использованием программы электродинамического 3D-моделирования HFSS. Применялся метод линейной интерполяции. Значения диэлектрической проницаемости включений неправильной формы $\epsilon_{\text{cnt}0}$, нитей в продольном направлении $\epsilon_{\text{cnt}\parallel}$ и нитей в поперечном направлении $\epsilon_{\text{cnt}\perp}$ оказались не равны друг другу. В результате удалось достичь хорошего соответствия спектров коэффициента отражения, измеренных экспериментально (рис. 3.9, б, кривая 2) и рассчитанных теоретически (рис. 3.9, б, кривая 3). Расчет комплексной диэлектрической проницаемости графитовых включений производился аналогичным способом. При этом объемная доля графита в образцах равнялась объемной доле УНТ.

Таблица 3.3 – Рассчитанные значения электрофизических параметров включений, состоящих из УНТ и графита.

	ε'	ε''	$\sigma, \Omega^{-1}\text{м}^{-1}$
$\varepsilon_{\text{cnt}0}$	7.85	2.70	1.42
$\varepsilon_{\text{cnt}\parallel}$	55.20	11.48	6.04
$\varepsilon_{\text{cnt}\perp}$	4.47	1.09	0.57
$\varepsilon_{\text{gr}0}$	17.31	2.84	1.49
$\varepsilon_{\text{gr}\parallel}$	23.49	4.15	2.18
$\varepsilon_{\text{gr}\perp}$	12.91	2.16	1.13

Значение диэлектрической проницаемости и электропроводности УНТ и графитовых частиц в продольном и поперечном направлениях могут отличаться на несколько порядков. Магнитная жидкость способствует ориентации структур из УНТ преимущественно вдоль вектора индукции магнитного поля, в которое помещаются образцы при полимеризации. Таким образом, анизотропия электрофизических параметров композитов ЭС/МЖ/УНТ, полимеризованных в магнитном поле, помимо наличия ориентированных нитевидных структур, определяется анизотропией электрофизических параметров самих нитей, которая обусловлена перколяционным эффектом, а также анизотропией диэлектрической проницаемости и электропроводности УНТ. Следует отметить, что степень анизотропии электрофизических параметров нитей из УНТ (табл. 3.4) существенно выше, чем графитовых включений, что обусловлено, вероятно, более высокой степенью выравнивания УНТ, чем частиц графита.

Таблица 3.4 – Степень анизотропии электрофизических параметров нитей из графита и УНТ.

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

Подытоживая результаты экспериментальных исследований и численных расчетов, были сделаны следующие выводы:

- В процессе полимеризации при приложении магнитного поля в композите ЭС/МЖ/УНТ(Графит) образуются вытянутые проводящие нитевидные структуры, что приводит к появлению анизотропии диэлектрической проницаемости и электропроводности композитов. Анизотропия электрофизических параметров композитов, содержащих нити из УНТ, выше, чем, содержащих нити из графита.
- Дефектная мода на спектре коэффициента отражения СВЧ-волны от фотонной структуры подавляется сильнее при размещении в качестве центрального слоя образца, 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.
- При определении анизотропии электрофизических параметров нитевидных структур, состоящих из суспензии МЖ/УНТ, необходимо принимать во внимание перколяционный эффект и различие диэлектрической проницаемости и электропроводности УНТ в ортогональных направлениях.
- Существует диапазон значений индукции магнитного поля (100-500 мТл), при котором процесс структурообразования (в эпоксидной смоле) нитей, состоящих из МЖ и УНТ, выходит на насыщение.
- Наблюдается уменьшение анизотропии электрофизических параметров композитов при большом отношении массы УНТ к массе МЖ, т.к. недостаточный объем магнитной жидкости не позволяет создать однородную ориентацию большого числа УНТ вдоль магнитного поля.
- Установлено наличие определенного порогового уровня концентрации суспензии МЖ/УНТ, диспергированной в эпоксидной смоле. При превышении этого уровня процессы формирования структуры ухудшаются, что, вероятно,

обусловлено изменениями реологических характеристик суспензии в процессе создания композита, что ведет к снижению анизотропии свойств композита.

Таким образом, определена степень анизотропии электрофизических параметров в сверхвысокочастотном диапазоне длин волн для композитов, включающих эпоксидную смолу, магнитную жидкость и углеродные нанотрубки, а также для композитов с эпоксидной смолой, магнитной жидкостью и графитом, что открывает перспективные возможности управления параметрами при разработке композитных материалов. Учет анизотропии свойств углеродных нанотрубок позволяет с большей точностью контролировать электрофизические параметры композитных материалов, содержащих углеродные нанотрубки.

4 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СВЧ-ДИАПАЗОНА С ОДНОМЕРНЫМИ ВОЛНОВОДНЫМИ ФОТОННЫМИ КРИСТАЛЛАМИ, СОДЕРЖАЩИМИ В КАЧЕСТВЕ НАРУШЕНИЯ СЛОЙ С НИТЕВИДНЫМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ

Параметрами материала возможно управлять путем добавления углеродных или металлических нитевидных включений. Существующие теории эффективных сред [124, 126] в основном предназначены для исследования параметров композитов с однородным заполнением. Учет неоднородностей может быть осуществлен с использованием СВЧ-методов.

В настоящей работе [37, 47] разработан метод расчета эффективной диэлектрической проницаемости и электропроводности композитов в результате анализа частотных зависимостей коэффициента отражения СВЧ-волны. При этом измеряемый образец, представляющий собой композит с наполнителем в виде «нитей» толщинами меньше 200 мкм, размещается в качестве нарушения фотонной структуры в центральном слое. Учитывается расположение нитей вдоль осей X и Z (в поперечном сечении волновода и вдоль направления распространения СВЧ-волны). При расчетах используется метод матриц передач и теории возмущений [39-41].

Отличие нашего метода от существующих теорий эффективных сред заключается в возможности определения параметров композитов, содержащих структуры из ориентированных нитей, распределенных неоднородно по объему образца. Метод позволил адекватно описать экспериментальные частотные зависимости коэффициента отражения [36] от неоднородного композита.

Основное преимущество разработанного метода над расчетом в специализированных программах, таких как Ansys HFSS заключается в возможности анализа структур с толщинами менее 15 мкм. Расчет в программах электродинамического моделирования при данных толщинах затруднителен, поскольку занимает значительное время.

4.1 Моделирование эксперимента

Был произведен теоретический расчет спектра коэффициента отражения СВЧ-излучения от СВЧ фотонного кристалла. Периодическая структура размещалась в прямоугольном волноводе 23x10 мм. Также было произведено электродинамическое моделирование в системе автоматизированного производства Ansys HFSS.

Периодическая структура включала слои фторопласта и поликора (рис. 4.1). Слои чередовались, общее количество слоев равнялось одиннадцати. В качестве центрального слоя размещался измеряемый образец – композит. Вследствие нарушения периодичности на спектре коэффициента отражения СВЧ-излучения возникает резкий минимум, положение которого зависит от параметров исследуемого композита.

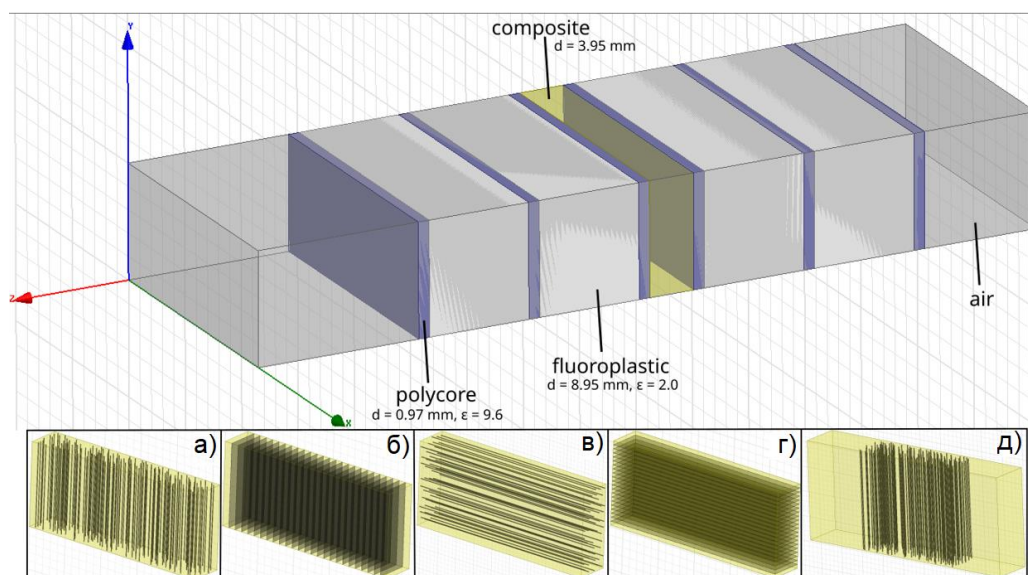


Рисунок 4.1 – Исследуемая фотонная структура. В центральном слое располагался образец, содержащий: а) и б) нитевидные включения и протяженные вдоль оси z пластины, расположенные коллинеарно электрической компоненте СВЧ-волны в волноводе, в) и г) ортогонально, д) нити локализованы в середине.

Композит представлял собой матрицу из эпоксидной смолы, в которой располагались тонкие нити с низким электрическим сопротивлением. Концентрация нитей изменялась от 0.1% до 10% (по объему). Для равномерного случайного распределения нитей по объему образца был написан скрипт с использованием языка программирования Visual Basic Script. Исследовалось

влияние на электрофизические свойства композита концентрации, параметров и ориентации нитей. Следует отметить, что при рассматриваемых параметрах нитей, параметры композита изменяются незначительно. Поэтому в экспериментах и расчетах использовалась многослойная периодическая структура, позволяющая в итоге увеличить точность определения параметров.

4.2 Теоретическое описание

4.2.1 Способ обозначений для записи многослойных структур

Поскольку в настоящей работе используется достаточно большое количество различных периодических и непериодических многослойных структур, было принято решение разработать специальные обозначения для записи таких структур.

Слой будем обозначать в следующем виде:

$$\underbrace{z_i S_i}_{d}$$

где S (от англ. single) – одиночный слой, d – толщина слоя, α – материал слоя (или интересующий параметр слоя), i – номер слоя, z_i – координата левой границы слоя. Теперь периодическая многослойная структура рис. 4.1, может быть записана следующим образом:

$$\underbrace{\text{air}}_{\infty} \underbrace{X_{12}}_{\infty} \underbrace{z_{11} S_{11}}_{d_1} \underbrace{z_{10} S_{10}}_{d_2} \underbrace{z_9 S_9}_{d_1} \underbrace{z_8 S_8}_{d_2} \underbrace{z_7 S_7}_{d_1} \underbrace{z_6 D_6}_{d_{\text{comp}}} \underbrace{z_5 S_5}_{d_1} \underbrace{z_4 S_4}_{d_2} \underbrace{z_3 S_3}_{d_1} \underbrace{z_2 S_2}_{d_2} \underbrace{z_1 S_1}_{d_1} \underbrace{z_0=0 X_0}_{\infty} \leftarrow, \quad (4.1)$$

где $comp$ – слой исследуемого композита, f – фторопласт, p – поликор. Символ D (от англ. dislocation) обозначает слой, представляющий собой нарушение периодичности. Электромагнитная волна распространяется справа налево, о чем указывает знак меньше справа от схемы. Координата z_n может быть рассчитана по одной из формул:

$$z_n = z_0 + \sum_{i=1}^n d_i, \quad z_n = z_N - \sum_{i=N}^{n+1} d_i, \quad z_n = z_{n+1} - d_{n+1},$$

где N – номер последнего слоя, d_i – толщина слоя с номером i .

Для периодических участков многослойной структуры введем обозначение периодической группы следующего вида:

$$\underbrace{\overbrace{z_i \Pi_i^4}^{\alpha|\beta}}_{a|b} = \underbrace{\overbrace{z_i S_4}^{\alpha}}_a \underbrace{\overbrace{z_{i-a} S_3}^{\beta}}_b \underbrace{\overbrace{z_{i-a-b} S_2}^{\alpha}}_a \underbrace{\overbrace{z_{i-2a-b} S_1}^{\beta}}_b, \quad (4.2)$$

где индекс 4 - общее количество чередующихся слоев толщиной a и b с параметрами α и β . Символ i обозначает номер конкретного слоя в контексте общей многослойной структуры, z_i - координата левой границы периодической группы в рамках объемлющей структуры.

Непериодические участки будем записывать как $\underbrace{\overbrace{z_i U_i^n}^{\alpha_j}}_{d_u}$, где d_u - толщина всей непериодической группы слоев.

В итоге многослойная структура (4.1) с учетом (4.2) запишется как:

$$\underbrace{\overbrace{X_2}^{\text{air}}}_{\infty} \underbrace{\overbrace{z_1 U_1^{11}}^{\alpha_i}}_{d_{pc}} \underbrace{\overbrace{X_0}^{\text{air}}}_{\infty} = \underbrace{\overbrace{X_6}^{\text{air}}}_{\infty} \underbrace{\overbrace{z_5 \Pi_5^4}^{\text{plf}}}_{d_1|d_2} \underbrace{\overbrace{z_4 S_4}^{\text{p}}}_{d_1} \underbrace{\overbrace{z_3 D_3}^{\text{comp}}}_{d_{\text{comp}}} \underbrace{\overbrace{z_2 S_2}^{\text{p}}}_{d_1} \underbrace{\overbrace{z_1 \Pi_1^4}^{\text{flp}}}_{d_2|d_1} \underbrace{\overbrace{z_0 X_0}^{\text{air}}}_{\infty} <, \quad (4.3)$$

где d_{pc} - общая толщина многослойной структуры.

4.2.2 Пример составления матрицы передачи с использованием введенных обозначений.

Для расчета электродинамических параметров многослойных структур будем использовать метод матриц передачи (см. раздел 2.2). Чтобы записать матрицу передачи \mathbf{T}_N через всю многослойную структуру (4.1), необходимо перемножить матрицы передачи через каждую границу:

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_{11} &= \mathbf{T}^{(11)}(z_{11}, \gamma_{air}, \gamma_p) \cdot \mathbf{T}^{(10)}(z_{11} - d_1, \gamma_p, \gamma_f) \cdot \mathbf{T}^{(9)}(z_{10} - d_2, \gamma_f, \gamma_p) \cdot \\ &\mathbf{T}^{(8)}(z_9 - d_1, \gamma_p, \gamma_f) \cdot \mathbf{T}^{(7)}(z_8 - d_2, \gamma_f, \gamma_p) \cdot \mathbf{T}^{(6)}(z_7 - d_1, \gamma_p, \gamma_{\text{comp}}) \cdot \mathbf{T}^{(5)}(z_6 - \\ &d_{\text{comp}}, \gamma_{\text{comp}}, \gamma_p) \cdot \mathbf{T}^{(4)}(z_5 - d_1, \gamma_p, \gamma_f) \cdot \mathbf{T}^{(3)}(z_4 - d_2, \gamma_f, \gamma_p) \cdot \mathbf{T}^{(2)}(z_3 - d_1, \gamma_p, \gamma_f) \cdot \\ &\mathbf{T}^{(1)}(z_2 - d_2, \gamma_f, \gamma_p) \cdot \mathbf{T}^{(0)}(z_1 - d_1, \gamma_p, \gamma_{air}) = \mathbf{T}^{(11)}(z_{11}, \gamma_{air}, \gamma_p) \cdot \\ &\prod_{i=10}^0 \mathbf{T}^{(i)}(z_{i+1} - d_{i+1}, \gamma_{i+1}, \gamma_i), \end{aligned} \quad (4.4)$$

где $z_{11} = z_0 + 6 \cdot d_1 + 4 \cdot d_2 + d_{comp}$

Чтобы понять, каким образом введенные обозначения позволяют составлять матрицу передачи, рассмотрим, например, границу между шестым и седьмым

слоем: $\underbrace{z_7 S_7}_{d_1} \left| \begin{array}{c} \text{comp} \\ \underbrace{z_6 D_6}_{d_{comp}} \end{array} \right.$. Из схемы очевидно, что у данной границы номер равен шести.

Координата границы может быть легко определена по формуле $z_6 = z_7 - d_1$. Слева от границы располагается слой поликора, справа – фторопласта. Теперь не составляет труда записать матрицу передачи через границу между шестым и седьмым слоем $\mathbf{T}^{(6)}(z_7 - d_1, \gamma_p, \gamma_{comp})$, где координата границы рассчитана, как координата левой границы седьмого слоя за вычетом толщины седьмого слоя.

Коэффициент отражения СВЧ-волны определенной частоты (2.5) вычисляется по формуле (2.10) после подстановки матрицы передачи (4.4). Частотная зависимость коэффициента отражения СВЧ-волны может быть построена, если произвести вычисления для множества частот из требуемого диапазона.

4.3 Модель «возмущенных слоев» (MPL)

Положение минимума на частотной зависимости коэффициента отражения от периодической структуры с нарушением зависит от электрофизических параметров нарушенного слоя. Если в качестве нарушенного слоя разместить исследуемый композит, то положение минимума будет зависеть от размеров и пространственного распределения включений, а также от их электропроводности и диэлектрической проницаемости.

Исследования будем производить на примере образца размером 23.00x10.00x4.0 мм. В качестве образца рассмотрим композит, содержащий равномерно случайно распределенные нитевидные включения толщиной d_c , параллельные вектору \mathbf{E} волны TE_{10} . Предлагаемая модель возмущенных слоев в дальнейшем тексте обозначается как MPL (Many Perturbation Layers).

4.3.1 Учет распределения включений вдоль оси Z

Разобьём участок волновода, содержащий исследуемый композиционный материал, на слои с равной толщиной d_c . Это дает возможность учесть профиль распределения включений по оси Z. Модель будет представлена количеством слоев равным $n = \text{ceil}\left(\frac{d_{comp}}{d_c}\right)$, где ceil – функция округления до ближайшего большего целого числа. На рис. 4.2 используются следующие обозначения:

- пунктирные линии – границы между слоями,
- квадраты (пунктир) – сечения нитей плоскостью XZ,
- прямоугольники (сплошная линия) – сечения параллелепипедов, на которые заменяются нити в модели MPL.

Из рис. 4.2 видно, что на границу между слоями попадают почти все нити. 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_i} :

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

где δ_i – ширина части нити d_c , попадающей в исследуемый слой с шириной d_{layer} . Толщина и высота параллелепипеда равны толщине слоя d_c и размеру узкой стенки волновода b_{wg} , соответственно. Если $d_c = d_{layer}$, то $d_{eff_i} = \delta_i$.

Каждый слой представляет собой неоднородный (в поперечном сечении) волновод. Неоднородности можно представить, как пластины различной толщины, протяженные вдоль оси Z. Количество пластин в слоях различно, некоторые слои не содержат пластин вовсе. Расположение включений в поперечном сечении волновода XY в реальном материале и модели MPL одно и то же. Вдоль оси Z расхождение модели с реальным композитом уменьшается с уменьшением толщины включений. Таким образом, модель MPL должна описывать взаимодействие поля с реальным композитом с высокой точностью.

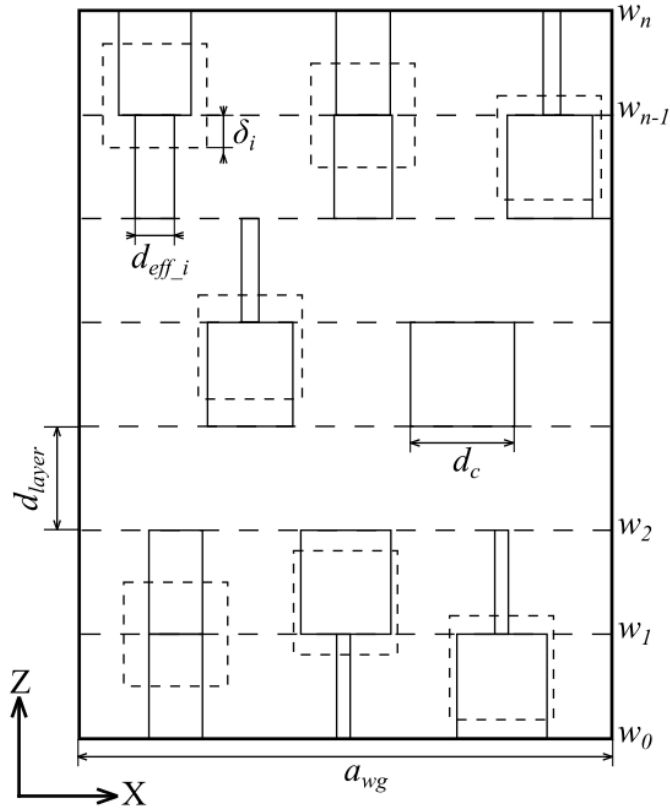


Рисунок 4.2 – Схема пространственного распределения нитей в продольном сечении волновода: контуры, обозначенные пунктиром, соответствуют нитям в исследуемом образце; прямоугольники со сплошными контурами соответствуют модельным нитям с эффективной толщиной; горизонтальный пунктир соответствует границам между слоями в многослойной модели.

Отметим, толщина последнего слоя $d_{last} \leq d_c$, поскольку количество слоев $\frac{d_{comp}}{d_c}$ может оказаться дробным числом. В итоге модель композита MPL можно записать следующим образом:

$$\underbrace{S}_{d_{comp}} = \underbrace{\gamma_n^{MPL}}_{d_{last}} \underbrace{\gamma_1^{MPL}}_{d_c}, \quad (4.5)$$

где γ_i^{MPL} ($i=1, 2 \dots n$) – постоянные распространения в каждом слое модели MPL, которые необходимо вычислять отдельно для каждой частоты СВЧ-волны в рассматриваемом диапазоне.

4.3.2 Учет распределения включений вдоль оси X

Воспользуемся методом теории возмущений для вычисления γ_i^{MPL} . Поперечное сечение волновода плоскостью XY одного из слоев представлено на рис. 4.3. Нити, представляющие собой возмущение, изображены пластинами, протяженными вдоль оси Z, с толщинами d_{eff_i} .

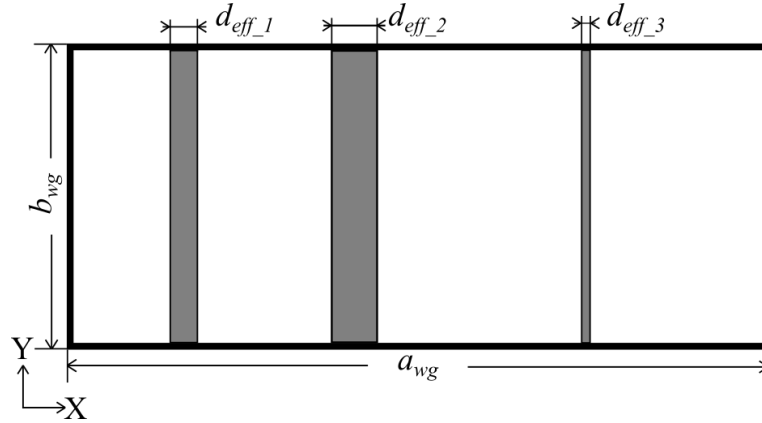


Рисунок 4.3 – Поперечное сечение волновода, содержащее один из слоев композита.

Уравнения Максвелла позволяют вывести формулу для объемного возмущения волновода [169]:

$$\Delta\gamma = \gamma_n - \gamma_0 = \omega \frac{\int_{S_n} (\Delta\varepsilon \cdot E_n \cdot \overline{E_0} + \Delta\mu \cdot H_n \cdot \overline{H_0}) ds}{\int_{S_0} ([\overline{E_0} \times H_n] + [E_n \times \overline{H_0}]) ds}, \quad (4.6)$$

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_n - \varepsilon_0, \quad \Delta\mu = \mu_n - \mu_0,$$

где S_0 – площадь поперечного сечения волноводного тракта,

S_n – площадь поперечного сечения, занимаемая возмущающей средой,

E_0, H_0 – векторы напряженности электрического и магнитного полей в регулярном (невозмущенном) волноводе,

E_n, H_n – векторы напряженности электрического и магнитного полей в волноводной структуре при наличии возмущения,

ε_0, μ_0 – диэлектрическая и магнитная проницаемости среды, заполняющей невозмущенный волновод,

ε_n, μ_n – диэлектрическая и магнитная проницаемости материала, обуславливающего возмущение,

γ_0, γ_n – постоянные распространения волны в невозмущенном и возмущенном волноводах, соответственно,

черта сверху обозначает операцию комплексного сопряжения.

Выражение (4.6) является точным. Для его использования требуется знать значения полей в волноводе без возмущения E_0, H_0 и с возмущением E_n, H_n . Определить последние в большинстве случаев затруднительно. Если неоднородности мало изменяют электромагнитное поле в волноводе [170], справедливы следующие соотношения:

$$E_n = E_0, \quad H_n = \frac{\gamma_n}{\gamma_0} H_0. \quad (4.7)$$

В нашем случае:

$$\begin{aligned} \gamma_0 &= \gamma_m, \quad \gamma_n = \gamma_i^{\text{MPL}} \\ \varepsilon_0 &= \varepsilon_m, \quad \varepsilon_n = \varepsilon_c, \\ \mu_0 &= \mu_n = 1 \end{aligned}$$

где ε_m и ε_c – комплексная диэлектрическая проницаемость матрицы и нитевидных включений, γ_m – постоянная распространения матрицы, γ_i^{MPL} – искомая постоянная распространения слоя с параллелепипедами, на которые были заменены нити в рамках модели MPL (с возмущением).

Постоянная распространения $\gamma_i^{\text{MPL}} = \gamma_i' + i\gamma_i''$ в каждом слое модели MPL является комплексной величиной и может быть определена для каждой частоты ω в результате решения уравнения:

$$S_{\text{pert}}(\omega, \gamma_i', \gamma_i'') = 0, \quad (4.8)$$

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

где x_k и $d_{\text{eff}k}$ – координата и эффективная толщина включения с порядковым номером k , b_{wg} – размер узкой стенки волновода, соответствующий высоте включения, N – суммарное число включений. Величины электрического и магнитного полей E_m и H_m задаются соотношениями:

$$E_y(x, \omega) = -\frac{\omega\pi}{a} \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right),$$

$$H_x(x, \omega) = -\frac{\sqrt{-1} \cdot \gamma_m(\omega) \cdot \pi}{\mu\mu_0 a} \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right),$$

$$H_z(x, \omega) = -\frac{\sqrt{-1} \cdot \pi^2}{\mu\mu_0 a^2} \cos\left(\frac{\pi x}{a}\right),$$

4.3.3 Запись матрицы передачи для модели «возмущенных слоев» MPL

Шестой слой, представляющий собой нарушение периодической структуры (4.3), записывается в виде (4.5) Полная схема n-слойной периодической структуры с исследуемым композитом в рамках модели MPL представима в следующем виде:

$$\underbrace{\left(\underbrace{\overbrace{X_6}^{\gamma_{\text{air}}}}_{\infty} \underbrace{\overbrace{Z_5 \Pi_5^4}_{\gamma_p | \gamma_f}}_{d_1 | d_2} \underbrace{\overbrace{Z_4 S_4}_{\gamma_p}}_{d_1} \right)_{z_3=z_4-d_1} \left(\underbrace{\overbrace{w_n=z_3 S_n}_{d_{\text{last}}}}_{\gamma_n^{\text{MPL}}} \underbrace{\overbrace{w_{n-1} U_1^{n-1}}_{d_c}}_{\gamma_i^{\text{MPL}}} \right)_{z_3-d_{\text{comp}}} \underbrace{\left(\overbrace{Z_3-d_{\text{comp}} S_2}_{\gamma_p} \underbrace{\overbrace{Z_1 \Pi_1^4}_{\gamma_f | \gamma_p}}_{d_2 | d_1} \underbrace{\overbrace{Z_0=0 X_0}_{\gamma_{\text{air}}}}_{\infty} \right)_{d_1}}_{d_2} <. \quad (4.9)$$

Или более подробно:

$$\underbrace{\left(\overbrace{X_{12}}^{\gamma_{\text{air}}} \underbrace{\overbrace{Z_{11} S_{11}}_{\gamma_p}}_{d_1} \underbrace{\overbrace{Z_{10} S_{10}}_{\gamma_f}}_{d_2} \underbrace{\overbrace{Z_9 S_9}_{\gamma_p}}_{d_1} \underbrace{\overbrace{Z_8 S_8}_{\gamma_f}}_{d_2} \underbrace{\overbrace{Z_7 S_7}_{\gamma_p}}_{d_1} \right)_{z_6=z_7-d_1} \left(\overbrace{w_n=z_6 S_n}_{d_{\text{last}}} \underbrace{\overbrace{w_{n-1} U_1^{n-1}}_{d_c}} \right)_{z_6} \underbrace{\left(\overbrace{Z_5 S_5}_{\gamma_p} \underbrace{\overbrace{Z_4 S_4}_{\gamma_f}}_{d_2} \underbrace{\overbrace{Z_3 S_3}_{\gamma_p}}_{d_1} \underbrace{\overbrace{Z_2 S_2}_{\gamma_f}}_{d_2} \underbrace{\overbrace{Z_1 S_1}_{\gamma_p}}_{d_1} \underbrace{\overbrace{Z_0=0 X_0}_{\gamma_{\text{air}}}}_{\infty} \right)_{d_1}}_{d_2} <. \quad (4.10)$$

Матрица передачи $\mathbf{T}_{\text{total}}$ через всю периодическую структуру может быть записана в следующем виде:

$$\mathbf{T}_{\text{total}} = \mathbf{T}_{\text{left}} \cdot \mathbf{T}_{\text{lb}} \cdot \mathbf{T}_{\text{MPL}} \cdot \mathbf{T}_{\text{rb}} \cdot \mathbf{T}_{\text{right}}, \quad (4.11)$$

$$\mathbf{T}_{\text{MPL}} = \mathbf{T}(w_{n-1}, \gamma_n^{\text{MPL}}, \gamma_{n-1}^{\text{MPL}}) \cdot \mathbf{T}(w_{n-1} - d_c, \gamma_{n-1}^{\text{MPL}}, \gamma_{n-2}^{\text{MPL}}) \cdot \dots \cdot \mathbf{T}(w_2 - d_c, \gamma_2^{\text{MPL}}, \gamma_1^{\text{MPL}}), \quad (4.12)$$

где \mathbf{T}_{MPL} матрица передачи через композит, представленный моделью MPL, \mathbf{T}_{left} и $\mathbf{T}_{\text{right}}$ – через левую и правую часть фотонной структуры относительно нарушенного слоя, \mathbf{T}_{lb} и \mathbf{T}_{rb} через левую и правую границу композита (4.5) с левой и правой частями периодической структуры, γ_i^{MPL} – постоянные распространения слоев модели MPL, определенные при решении численными методами уравнения (4.8), $w_{n-1} = z_6 - d_{\text{last}}$. Отметим, что при расчете координат слоев должна использоваться единая для всей структуры система координат.

Итоговая матрица передачи через фотонную структуру с нарушением в рамках модели MPL получается после подстановки (4.12) в (4.11):

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_{total} = & \mathbf{T}^{(11)}(z_{11}, \gamma_{air}, \gamma_p) \cdot \mathbf{T}^{(10)}(z_{11} - d_1, \gamma_p, \gamma_f) \cdot \mathbf{T}^{(9)}(z_{10} - d_2, \gamma_f, \gamma_p) \cdot \\ & \mathbf{T}^{(8)}(z_9 - d_1, \gamma_p, \gamma_f) \cdot \mathbf{T}^{(7)}(z_8 - d_2, \gamma_f, \gamma_p) \cdot \mathbf{T}^{(6)}(z_7 - d_1, \gamma_p, \gamma_n^{MPL}) \cdot \mathbf{T}_{MPL} \cdot \\ & \mathbf{T}^{(5)}(z_6 - d_{comp}, \gamma_1^{MPL}, \gamma_p) \cdot \mathbf{T}^{(4)}(z_5 - d_1, \gamma_p, \gamma_f) \cdot \mathbf{T}^{(3)}(z_4 - d_2, \gamma_f, \gamma_p) \cdot \mathbf{T}^{(2)}(z_3 - \\ & d_1, \gamma_p, \gamma_f) \cdot \mathbf{T}^{(1)}(z_2 - d_2, \gamma_f, \gamma_p) \cdot \mathbf{T}^{(0)}(z_1 - d_1, \gamma_p, \gamma_{air}), \end{aligned} \quad (4.13)$$

где

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_{left} = & \mathbf{T}^{(11)}(z_{11}, \gamma_{air}, \gamma_p) \cdot \mathbf{T}^{(10)}(z_{11} - d_1, \gamma_p, \gamma_f) \cdot \mathbf{T}^{(9)}(z_{10} - d_2, \gamma_f, \gamma_p) \cdot \\ & \mathbf{T}^{(8)}(z_9 - d_1, \gamma_p, \gamma_f) \cdot \mathbf{T}^{(7)}(z_8 - d_2, \gamma_f, \gamma_p), \\ \mathbf{T}_{right} = & \mathbf{T}^{(4)}(z_5 - d_1, \gamma_p, \gamma_f) \cdot \mathbf{T}^{(3)}(z_4 - d_2, \gamma_f, \gamma_p) \cdot \mathbf{T}^{(2)}(z_3 - d_1, \gamma_p, \gamma_f) \cdot \\ & \mathbf{T}^{(1)}(z_2 - d_2, \gamma_f, \gamma_p) \cdot \mathbf{T}^{(0)}(z_1 - d_1, \gamma_p, \gamma_{air}), \\ \mathbf{T}_{lb} = & \mathbf{T}^{(6)}(z_7 - d_1, \gamma_p, \gamma_n^{MPL}), \\ \mathbf{T}_{rb} = & \mathbf{T}^{(5)}(z_6 - d_{comp}, \gamma_1^{MPL}, \gamma_p). \end{aligned}$$

Частотную зависимость коэффициента отражения $R_{MPL}(\omega)$ от такого рода структур можно построить, подставив (4.13) в (2.10).

4.4 Пластинчатая модель композита (EPM)

В упрощенной модели многослойная структура MPL может быть заменена одним слоем, содержащим одинаковые тонкие пластины, равноудаленные друг от друга вдоль оси X. Дадим такой «пластинчатой модели» название *EPM* (Equidistant Plates Model).

Расчет геометрических параметров пластин производится с использованием выражений:

$$\begin{aligned} L_{pl} &= a_{wg} / (N_{pl} + 1), \\ d_{pl} &= (v_c * a_{wg}) / N_{pl}, \end{aligned}$$

где N_{pl} – суммарное число пластин, d_{pl} – толщина пластины вдоль оси X , L_{pl} – интервал между соседними пластинами, ν_c – концентрация включений по объему, a_{wg} – размер волновода вдоль оси X .

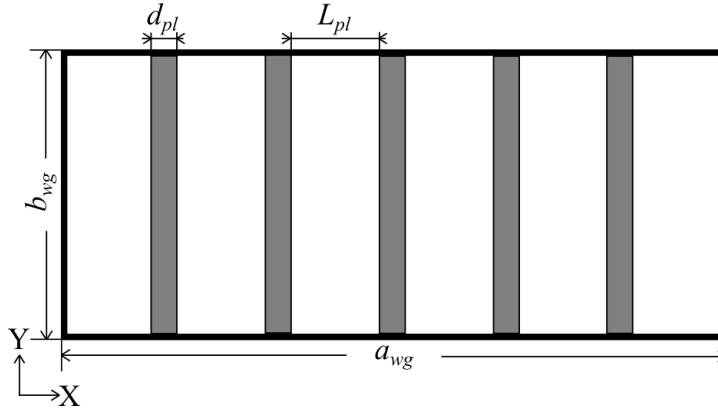


Рисунок 4.4 – Эквивалентная «пластинчатая модель» (ERM), представленная в виде структуры из пяти эквидистантных пластин.

Частотная зависимость коэффициента отражения с использованием модели ERM рассчитывается от следующей многослойной структуры:

$$\underbrace{\overbrace{X_6}^{\gamma_{air}}}_{\infty} \underbrace{\overbrace{z_5 \Pi_5^4}^{\gamma_p | \gamma_f}}_{d_1 | d_2} \underbrace{\overbrace{z_4 S_4}^{\gamma_p}}_{d_1} \underbrace{\overbrace{z_3 D_3}^{\gamma_{ERM}}}_{d_{comp}} \underbrace{\overbrace{z_2 S_2}^{\gamma_p}}_{d_1} \underbrace{\overbrace{z_1 \Pi_1^4}^{\gamma_f | \gamma_p}}_{d_2 | d_1} \underbrace{\overbrace{z_0 X_0}^{\gamma_{air}}}_{\infty}, \quad (4.14)$$

γ_{ERM} находится из уравнения (4.8). Частотная зависимость коэффициента отражения $R_{ERM}(\omega)$ вычисляется по формуле (2.10) с учетом матрицы (4.4), в которой вместо γ_{comp} следует подставить γ_{ERM} .

4.5 Расчет эффективной диэлектрической проницаемости

Обычно при анализе электрофизических свойств многокомпонентных сред прибегают к методам теории эффективной среды EMT (Effective Medium Theory). Эффективная диэлектрическая проницаемость ϵ_{eff} композитов, содержащих частицы эллипсоидальной формы с объемной долей ν_c , может быть найдена из формулы Максвелла-Гарнетта [171]:

$$\epsilon_{eff} = \epsilon_m + \frac{\nu_c \cdot (\epsilon_c - \epsilon_m) \cdot \epsilon_m / [\epsilon_m + (\epsilon_c - \epsilon_m) \cdot N]}{1 - \nu_c \cdot (\epsilon_c - \epsilon_m) \cdot N / [\epsilon_m + (\epsilon_c - \epsilon_m) \cdot N]}, \quad (4.15)$$

где ε_m – диэлектрическая проницаемость матрицы, ε_c – включений, представляющих собой эллипсоиды, N – деполяризующий фактор. Деполяризующий фактор для нитей в приближении вытянутых эллипсоидов задается соотношением:

$$N \approx \frac{b^2}{a^2} \ln \frac{a}{b} = \frac{d_c^2}{b_{wg}^2} \ln \frac{b_{wg}}{d_c},$$

где a и b – линейные размеры полуосей эллипсоидальных включений, b_{wg} и d_c – длина и толщина включений.

В настоящей работе частотные зависимости $R_{MPL}(\omega)$ и $R_{EPM}(\omega)$ будут использованы для вычисления эффективных электрофизических параметров композитов, содержащих нитевидные включения. Для этого необходимо вместо слоя, представленного моделью MPL или EPM, в качестве нарушения периодической структуры разместить слой с эффективной постоянной распространения γ_{eff} :

$$\underbrace{\text{air}}_{\infty} \underbrace{\gamma_p | \gamma_f}_{z_5 \Pi_5^4} \underbrace{\gamma_p}_{z_4 S_4} \underbrace{\gamma_{eff}}_{z_3 D_3} \underbrace{\gamma_p}_{z_2 S_2} \underbrace{\gamma_f | \gamma_p}_{z_1 \Pi_1^4} \underbrace{\text{air}}_{z_0=0 X_0}, \quad (4.16)$$

где

$$\gamma_{eff}(\omega, \varepsilon', \sigma) = \sqrt{\frac{\pi^2}{a^2} - \omega^2 \varepsilon_0 \mu_0 \varepsilon_{eff}(\varepsilon', \sigma) \mu_{eff}},$$

$$\varepsilon_{eff}(\omega, \varepsilon', \sigma) = \varepsilon' - i \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \omega},$$

μ_{eff} – эффективная магнитная проницаемость композита ($\mu_{eff} = 1$),

ε' – действительная часть эффективной диэлектрической проницаемости композита,

σ – эффективная электропроводность композита,

d_{comp} – толщина слоя, представляющего собой нарушение периодической структуры.

Матрица передачи для (4.16) представима формулой (4.4). Частотная зависимость $R_{eff}(\omega, \varepsilon', \sigma)$ рассчитывается с использованием (2.10).

Искомые эффективные параметры вычисляются в результате минимизации численными методами значения следующей функции:

$$S_{\text{eff}}(\varepsilon', \sigma) = \frac{(R_{\text{eff}}(\omega, \varepsilon', \sigma)_{\text{min}} - R_X(\omega)_{\text{min}})^2}{|R_X(\omega)_{\text{min}}|} + \frac{(f_{\text{eff}}(\omega, \varepsilon', \sigma)_{\text{min}} - f_X(\omega)_{\text{min}})^2}{f_X(\omega)_{\text{min}}},$$

$$S_{\text{eff}}(\varepsilon', \sigma) = 0, \quad (4.17)$$

где $f_{\text{eff}}(\omega, \varepsilon', \sigma)_{\text{min}}$ и $R_{\text{eff}}(\omega, \varepsilon', \sigma)_{\text{min}}$ – резонансная частота и глубина минимума, рассчитанные по формуле (2.10), в спектре отражения СВЧ-излучения от периодической структуры (4.16), $f_X(\omega)_{\text{min}}$ и $R_X(\omega)_{\text{min}}$ – величины, рассчитанные с использованием модели $X = \text{EPM}, \text{MPL}$.

4.6 Результаты моделирования и обсуждение

В настоящей работе осуществлялось сравнение электрофизических параметров волокнистых композитов, рассчитанных по 4-м различным моделям (табл. 4.1). Расчеты в HFSS с высокой степенью точности коррелируют с экспериментально измеренными частотными зависимостями, поэтому было принято решение использовать параметры, определенные по методу конечных элементов *FEM*, в качестве эталонных. В [31] метод конечных элементов использовался для описания взаимодействия электромагнитного излучения с металлополимерными нанокompозитами, содержащими включения сферической формы. Расхождение результатов моделирования и экспериментальных результатов объяснялось не идеальностью поверхности и неоднородностью композита.

В роли полимерной матрицы использовалась эпоксидная смола ($\varepsilon_m = 3.2 - 0.05i$). Функцию включений выполняли нитевидные структуры, характеризующиеся малым удельным сопротивлением. Параметры нитей обозначаются следующим образом: ε_c – действительная часть диэлектрической проницаемости, σ_c – электропроводность, v_c – объемная доля от общего объема композита, занимаемая включениями, $N_c = K_c / (d_{\text{comp}} \cdot a_{\text{wg}})$ – количество

включений на единицу площади (шт/мм²), K_c – общее количество включений в образце композита в форме параллелепипеда с габаритами 23.00x10.00x4.00мм.

Таблица 4.1 – Список анализируемых моделей.

Название	Описание	Методика расчета
<i>FEM</i>	<i>Finite Elements Method</i> . Нити расположены в композите равномерно и ориентированы параллельно вектору E СВЧ-волны.	В САПР HFSS по методу FEM
<i>MPL</i>	<i>Many Perturbation Layers</i> . Многослойная модель, реальный композит заменяется матрицей, содержащей нити с эффективной толщиной.	В программном пакете Mathcad, с использованием теории возмущения
<i>ERM</i>	<i>Equidistant Plates Model</i> . «Пластинчатая модель»	
<i>EMT</i>	<i>Effective Medium Theory</i> . Теория эффективной среды Максвелла-Гарнетта. Нити заменяются эллипсоидами.	Расчет по формуле (4.15)

Отклонение параметра X от эталонного значения, рассчитанного методом конечных элементов FEM, будем вычислять по следующей формуле:

$$\delta X^k = \frac{\sqrt{(X^k - X^{FEM})^2}}{X^{FEM}} \cdot 100\%, \quad (4.18)$$

где $k = MPL, ERM, EMT$ – модель для которой рассчитывается отклонение параметра $X = f_{min}, R_{min}, \varepsilon_{comp}, \sigma_{comp}$.

4.6.1 Применимость модели «возмущенных слоев» MPL для расчета спектра коэффициента отражения.

Пока объемная доля нитей мала, наблюдается совпадение (рис. 4.5) частотных зависимостей коэффициента отражения от периодической структуры, содержащей в центральном слое образец исследуемого композита, построенных по модели *MPL* и *FEM*.

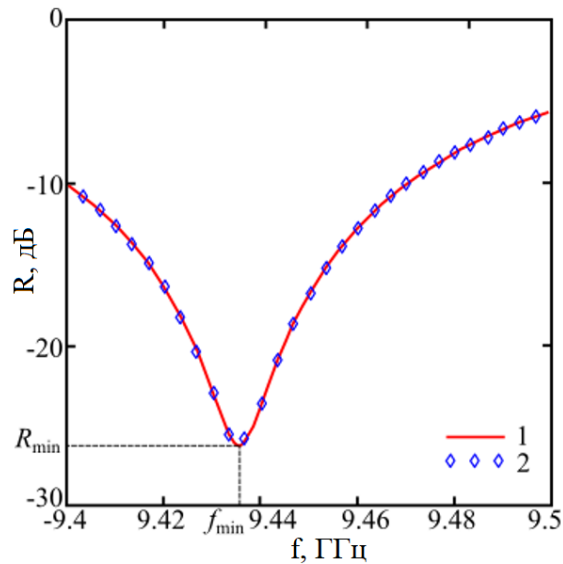


Рисунок 4.5 – Частотная зависимость коэффициента отражения СВЧ-излучения от периодической структуры с нарушенным центральным слоем, полученная на основе: 1 – метода *FEM*, 2 – модели *MPL*. В качестве нарушения используется композит с параметрами: $N_c = 1.6$ шт/мм², $\nu_c = 0.5\%$, $\varepsilon_c = 50$, $\sigma_c = 5$ Ом⁻¹м⁻¹.

Спектр коэффициента отражения *MPL* тем лучше совпадает (рис. 4.6) со спектром, рассчитанным с использованием метода конечных элементов, чем больше количество нитей в композите N_c . Различие спектров обусловлено тем, что при малом количестве нитей их толщина увеличивается, при этом приближение (4.7) оказывается не справедливым.

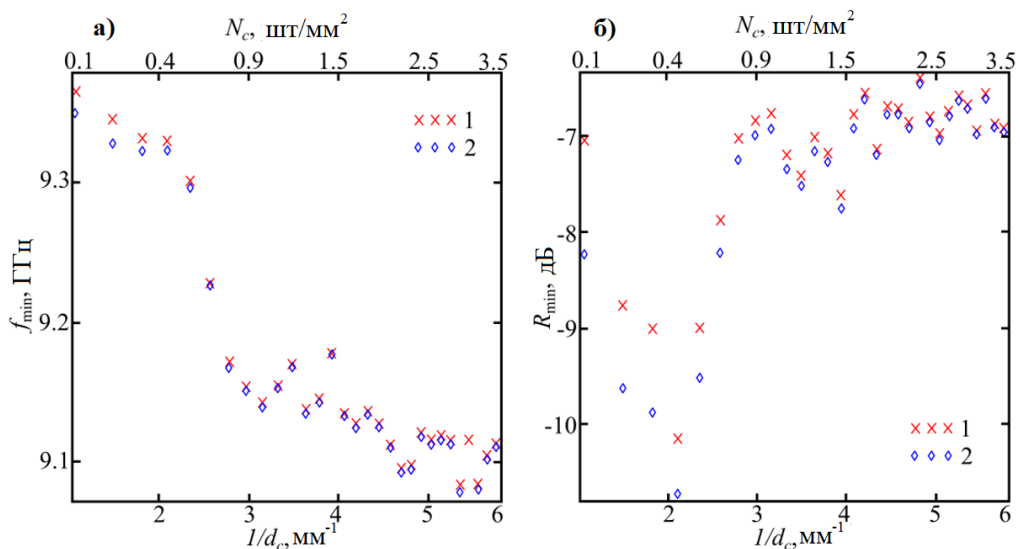


Рисунок 4.6 – Зависимости частоты f_{\min} (а) и величины R_{\min} (б) минимума коэффициента отражения от обратной толщины нитей (верхняя шкала отражает их количество), полученные на основе: 1 – метода конечных элементов *FEM*, 2 – модели «возмущенных слоев» *MPL*. Концентрация нитей по объему $\nu_c = 10\%$.

В случае, если концентрация нитей не превышает 1.5 шт/мм², отклонение частоты минимума коэффициента отражения составляет менее 0.05% (рис. 4.7, а), величины - менее 1% (рис. 4.7, б).

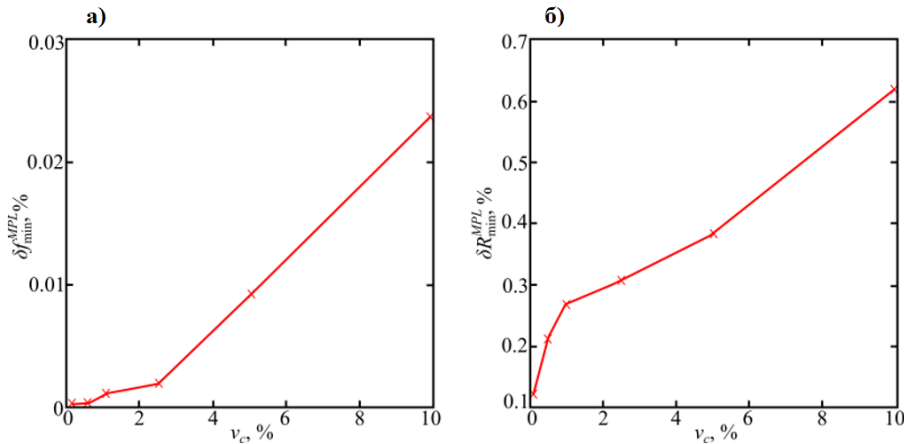


Рисунок 4.7 – Отклонение частоты δf_{\min}^{MPL} (а) и величины δR_{\min}^{MPL} (б) минимума коэффициента отражения от объемной доли включений при количестве нитей $N_c = 1.6$ шт/мм².

Поэтому при оценке зависимости точности расчета спектров коэффициента отражения от диэлектрической проницаемости и электропроводности нитей ϵ_c и σ_c будем рассматривать композиты с концентрацией нитей $N_c = 1.6$ шт/мм²

Зависимость отклонения частоты δf_{\min}^{MPL} и величины минимума δR_{\min}^{MPL} коэффициента отражения от действительной части диэлектрической проницаемости и электропроводности включений представлены на рис. 4.8.

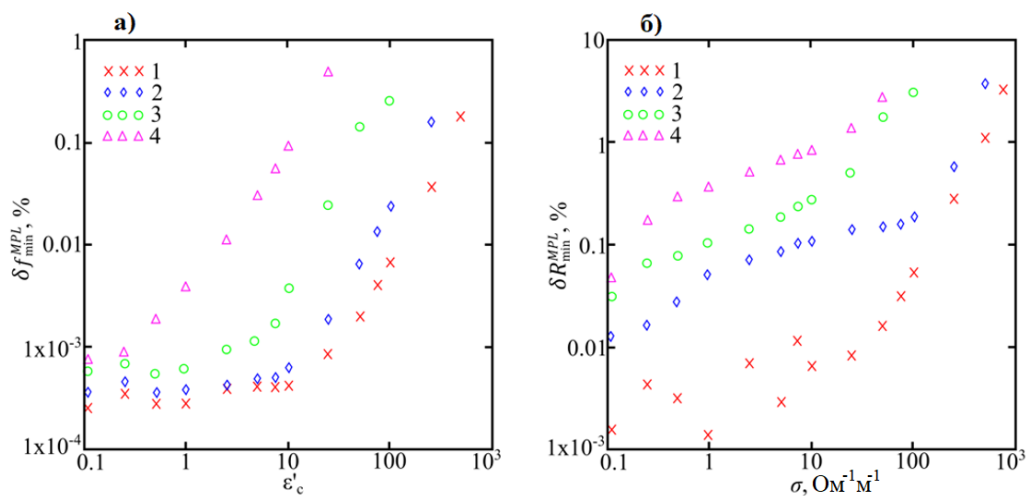


Рисунок 4.8 – Зависимость отклонения частоты минимума δf_{\min}^{MPL} от диэлектрической проницаемости включений ϵ_c (а) и величины минимума δR_{\min}^{MPL} от проводимости включений σ_c (б) при количестве нитей $N_c = 1.6$ шт/мм² и объемных долях включений v_c : 1 – 0.5%, 2 – 1.0%, 3 – 5.0%, 4 – 10.0%.

При диэлектрической проницаемости ε_c и электропроводности σ_c нитей менее 100 и их объемной доле $\nu_c < 2.5\%$, расчет с использованием модели MPL достаточно хорошо коррелирует с результатами моделирования в HFSS методом конечных элементов ($\delta R_{\min}^{MPL} < 1.0\%$, $\delta f_{\min}^{MPL} < 0.2\%$). При возрастании ν_c увеличивается и расхождение частотных зависимостей. Следует отметить, что при $\varepsilon_c < 50$, $\sigma_c < 50$ и объемной доле нитей $\nu_c < 5\%$ погрешность определения положения минимума на частотной зависимости коэффициента отражения составляет $\delta f_{\min}^{MPL} < 0.2\%$, $\delta R_{\min}^{MPL} < 2.0\%$, что приводит к погрешности определения электрофизических параметров менее 5% (рис. 4.9).

Возрастание электропроводности нитей σ_c приводит к «размытию» резонансной кривой вследствие уменьшения добротности электродинамической системы, что приводит к увеличению погрешности. Предельное значение электропроводности нитей, при которой модель MPL позволяет определять электрофизические параметры композита (с погрешностью менее 1%), зависит от объемной доли включений (рис. 4.10).

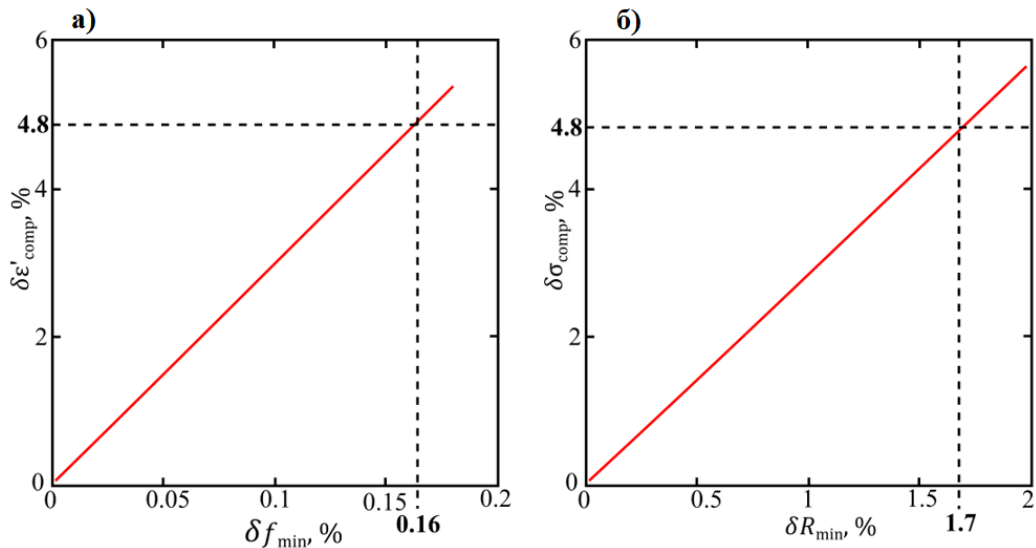


Рисунок 4.9 – Зависимость погрешности определения эффективной диэлектрической проницаемости $\delta\varepsilon'_{comp}$ (а) и электропроводности $\delta\sigma_{comp}$ (б) композита от погрешности измерения частоты и величины минимума коэффициента отражения СВЧ-излучения от периодической структуры, содержащей в центральном слое исследуемый композит.

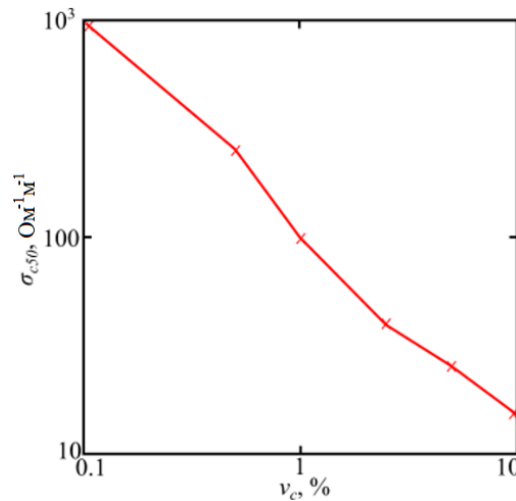


Рисунок 4.10 – Зависимость электропроводности нитей, обеспечивающей 50-кратное падение добротности резонанса относительно немодифицированной матрицы, от объемной доли наполнителя.

4.6.2 Определение электрофизических параметров однородных композитов с использованием пластинчатой модели EPM.

Точное расположение нитей в объеме образца, необходимое для использования модели *MPL*, зачастую получить затруднительно. Модель *EPM* лишена данного недостатка и может быть применена, если нитевидные включения распределены равномерно по объему композита. По-прежнему будем исследовать композит на основе эпоксидной смолы, содержащий проводящие нити ($v_c = 0.5\%$, $\varepsilon_c = 50$, $\sigma_c = 5 \text{ Ом}^{-1}\text{ м}^{-1}$). Величина и частота минимума на спектре коэффициента отражения от периодической структуры с нарушением в виде исследуемого композита зависит от количества нитей (рис. 4.11). Собственно, по данным величинам и осуществляется расчет эффективных электрофизических параметров композитов.

Отклонение частоты f_{min} (рис. 4.11, а, кривая 1) и величины R_{min} (рис. 4.11, б, кривая 1) минимума коэффициента отражения (расчет в HFSS) от монотонной зависимости объясняется тем, что нитевидные включения расположены по объему образца случайным образом. С увеличением концентрации включений ($N_c > 2 \text{ шт/мм}^2$) положение минимума, рассчитанного в HFSS, стремится к минимуму, найденному в рамках модели *EPM* (рис. 4.11).

Кривые, найденные с использованием модели ЕРМ (рис. 4.11, кривые 2), выходят на насыщение при увеличении количества пластин до нескольких десятков.

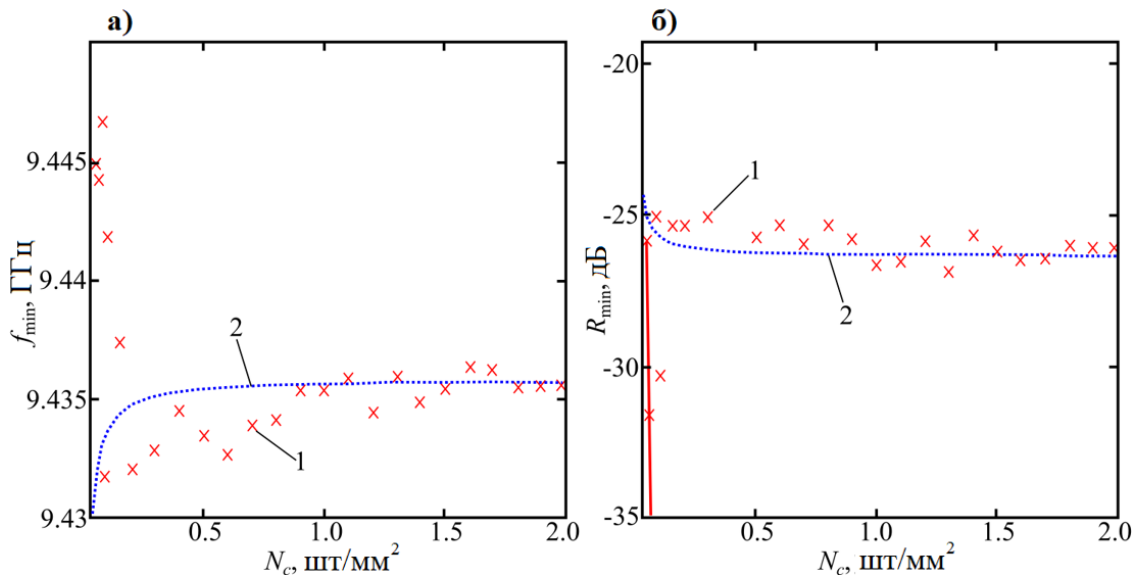


Рисунок 4.11 – Влияние количества нитей N_c в образце ($\nu_c = 0.5\%$, $\varepsilon_c = 50$, $\sigma_c = 5 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$), выступающего в качестве нарушения периодичности фотонной структуры, на частоту (а) и величину (б) минимума коэффициента отражения СВЧ-излучения, моделирование осуществлялось: 1 – методом конечных элементов *FEM*, 2 – по пластинчатой модели *ЕРМ* с использованием теории возмущений.

По формуле (4.17) в результате решения обратной задачи численными методами были определены эффективные электропроводность и диэлектрическая проницаемость композита (рис. 4.12, а, б), погрешность определения параметров (4.18) показана на рис. 4.12, в, г.

Таким образом, случайное распределение включений влияет на точность определения эффективных электрофизических параметров композитных материалов. Расчет с использованием ЕРМ не требует определения расположения нитей по объему образца, что упрощает экспериментальную часть исследований, в тоже время, в отличие от модели MPL, значительно упрощается сам метод и время расчета. При объемной доле $\nu_c = 1\%$ и количестве нитей $N_c > 1.0$ шт/мм² погрешность вычисления эффективной электропроводности композита находится в пределах 10%, а диэлектрической проницаемости – в пределах 1%.

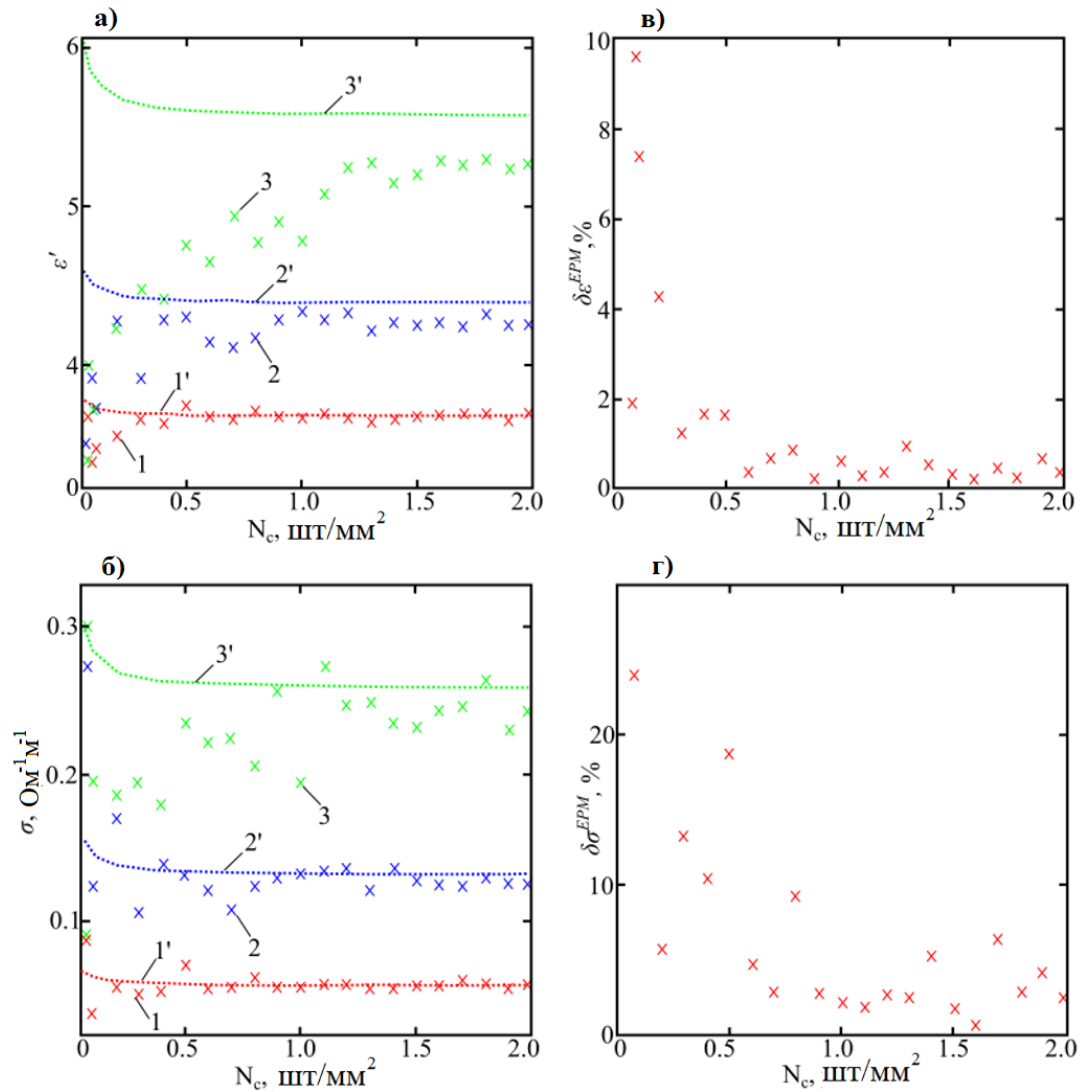


Рисунок 4.12 – Рассчитанные в рамках моделей FEM (кривые 1, 2, 3) и ERM (кривые 1', 2', 3') зависимости эффективных электрофизических параметров композита от количества нитей при различных концентрациях v_c (1 – 1%, 2 – 2.5%, 3 – 5%): а) действительная часть диэлектрической проницаемости ϵ' , б) удельная электропроводность σ ; расхождение моделей ERM и FEM для эффективной диэлектрической проницаемости (в) и электропроводности (г) композита при объемной доле включений $v_c = 1\%$.

Также, как и в случае с другими моделями, остается возможным определение параметров самих включений по измеренным эффективным параметрам композита. В качестве примера, была определена электропроводность ($\sigma_c = 6.4 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$) и диэлектрическая проницаемость ($\epsilon'_c = 53.0$) нитевидных включений, содержащих проводящие углеродные нанотрубки (рис. 4.13). При этом использовались экспериментально измеренные частотные зависимости, описанные в предыдущем разделе [36]. Погрешность определения параметров составила

$\delta \varepsilon_c^{EPM} = 4\%$ и $\delta \sigma_c^{EPM} = 6\%$ (за эталонные значения принимались параметры, найденные в результате моделирования методом конечных элементов в программе HFSS).

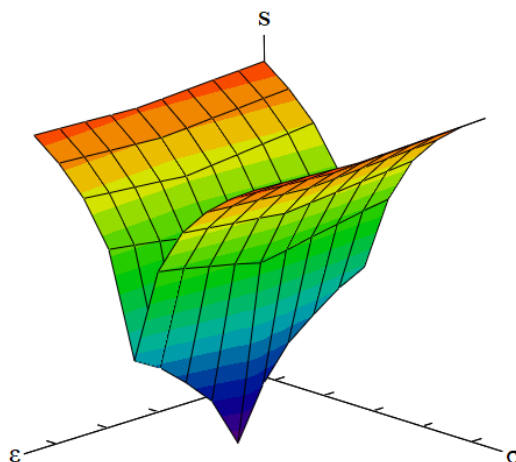


Рисунок 4.13 – Определение параметров наполнителя по минимуму функции невязки при решении обратной задачи (расчет коэффициента отражения от композита выполнен по пластинчатой модели EPM).

Представление поля в виде TE_{m0} волн приводит к несовместным уравнениям в том случае, если вектор \mathbf{E} ортогонален границе раздела слоев (рис. 4.1, в, г). Это свидетельствует о том, что поле волны представлено недостаточно полно. Действительно, между частями волновода, заполненного различными средами, происходит энергообмен. Он оказывается невозможен, если вектор Умова-Пойтинга равен нулю. Это и реализуется в нашем случае, когда вектор \mathbf{E} ортогонален границам раздела. При распространении волны возникает продольная составляющая электрического поля, которая отсутствует у любой волны из класса TE . [172] Поэтому для расчета параметров композитов с нитями, расположенными ортогонально вектору \mathbf{E} , метод теории возмущений, следовательно модели MPL и EPM , использовать нельзя (рис. 4.14). Поля, содержащие продольные составляющие, требуют применения для своего описания линейной комбинации TE - и TM -волн.

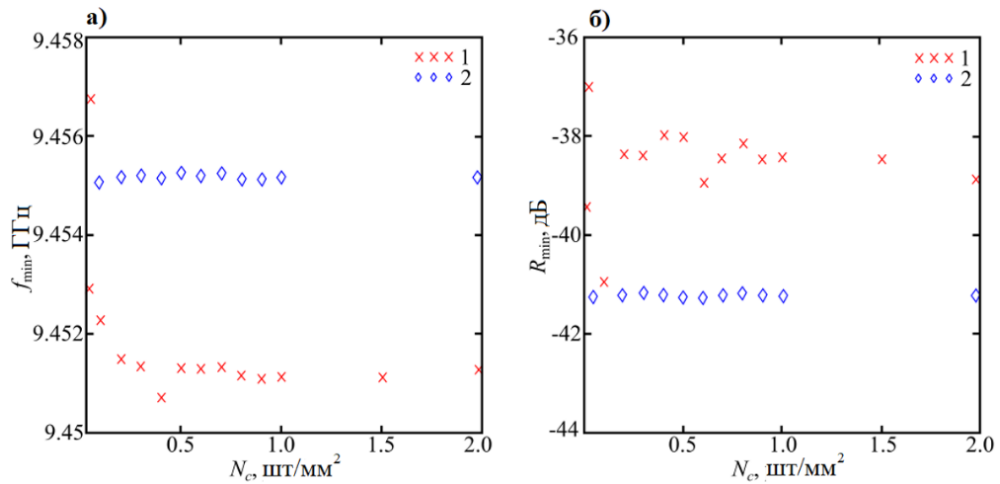


Рисунок 4.14 – Влияние количества нитей (1) и пластин (2), расположенных параллельно широкой стенке волновода (ортогонально вектору напряженности электрического поля), на спектральное положение частоты f_{\min} (а) и уровня R_{\min} (б) резонансного минимума коэффициента отражения. Результаты получены путем численного моделирования методом FEM в среде ANSYS HFSS.

4.6.3 Сравнение результатов расчета параметров при использовании различных моделей.

При расчете электрофизических параметров однородных композитов зачастую используется модель эффективной среды *EMT*. Однако ранее было показано, что на зависимости минимума коэффициента отражения от количества включений имеются отклонения от монотонной зависимости, которые в модели эффективной среды не учитываются. С увеличением количества нитей отклонения уменьшаются, но значительно возрастает время расчета с использованием программы HFSS при $N_c > 5.0$ шт/мм² и $d_c < 15$ мкм. В том случае, если параметры нитей не слишком сильно отличаются от параметров матрицы или объемная доля включений мала, становится оправданным применение модели *MPL*.

Формулу средней относительной ошибки будем применять для оценки точности расчета параметров однородного композита, содержащего ориентированные проводящие нитевидные включения, по модели *MPL*:

$$\delta X_{avg}^{MPL}(v_c) = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} \sqrt{\frac{\left(X_{MPL}(N_i, v_c) - \frac{\sum_{i=0}^{n-1} X_{MPL}(N_i, v_c)}{n} \right)^2}{X_{MPL}(N_i, v_c)}}, \quad (4.19)$$

где X_{MPL} – параметр (ε' или σ), погрешность которого вычисляется, рассчитанный с использованием модели MPL при объемной доле нитей v_c и их количестве N_i , n – количество композитов, по которым происходит усреднение, с количеством нитей N_i .

Расчеты, полученные по модели MPL , в рассматриваемом диапазоне объемных долей и параметров включений, находятся в хорошем соответствии с методом конечных элементов FEM . Поэтому для вычисления погрешности определения параметров по моделям EPM и EMT , можно использовать формулу для ошибки параметра, относительно среднего значения MPL :

$$\delta X_{avg}^{EMT}(v_c) = \frac{X_{EPM}(N_i, v_c) - \frac{\sum_{i=0}^{n-1} X_{MPL}(N_i, v_c)}{n}}{\frac{\sum_{i=0}^{n-1} X_{MPL}(N_i, v_c)}{n}}. \quad (4.20)$$

Зависимость $\delta\varepsilon_{avg}$ и $\delta\sigma_{avg}$ от объемной доли включений показана на рис. 4.15. В вычислениях с использованием выражений (4.19) и (4.20) принималось, что $n = 10$ (значение N_i варьировалось с шагом 50 от 1000 до 1500).

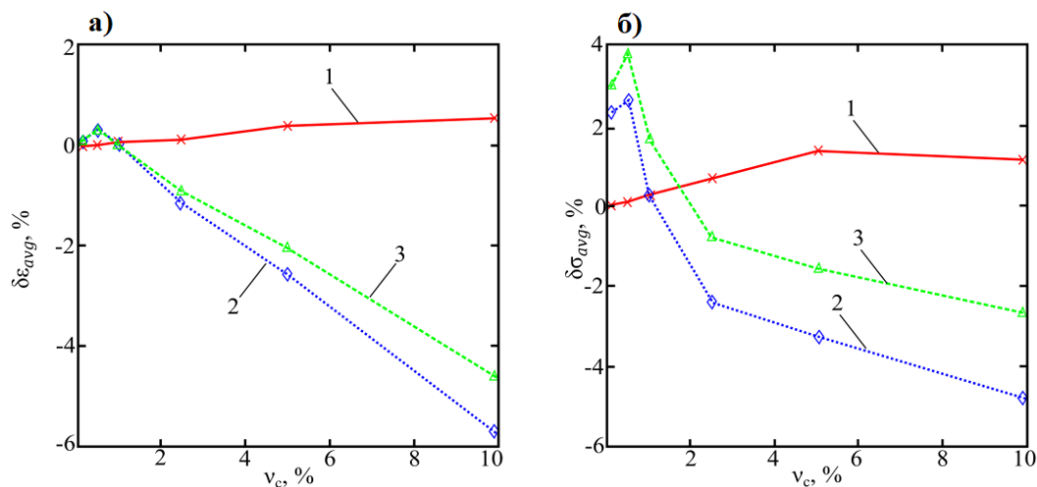


Рисунок 4.15 – Влияние объемной доли однородно распределенных включений ($\varepsilon_c = 50, \sigma_c = 5 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$) на погрешность определения действительной части диэлектрической проницаемости (а) и проводимости (б) композита: 1 – средняя относительная ошибка моделирования с использованием модели MPL , 2 – относительное отклонение значений параметров, рассчитанных с использованием модели MPL , от модели EPM , 3 – от модели EMT .

Уменьшение случайных отклонений частоты и величины минимума коэффициента отражения приводит к возникновению спада средней относительной ошибки (рис. 4.15, б, кривая 1) при большой концентрации включений. Это

обусловлено тем, что при больших концентрациях нитевидные включения обладают более равномерным распределением в объеме образца.

Когда концентрация включений достаточно мала $v_c < 1\%$, диэлектрическая проницаемость достаточно точно определяется с использованием моделей ЕРМ (рис. 4.15, а, кривые 2) и ЕМТ (рис. 4.15 а, кривые 3). Но для электропроводности получается значительная погрешность (рис. 4.15 б, кривые 2, 3). Такой вид зависимости связан со случайными отклонениями величины и частоты минимума коэффициента отражения (рис. 4.6). На значение $\delta\sigma_{avg}$ влияет выбор диапазона, применяемый при расчете в (4.20) выражения $\frac{\sum_{i=0}^{n-1} X_{MPL}(N_i, v_c)}{n}$. В расчетах использовался диапазон от 1000 до 1500 нитей. При небольших объемных долях включений значения электропроводности (MPL и ЕМТ) оказываются меньше значений, полученных по формуле эффективной среды ЕМТ, при больших объемных долях, больше. Возможно это свидетельствует о том, что параметры композита зависят не только от объемной доли нитевидных включений, но и от их количества, что указывает на необходимость дальнейших исследований.

Таким образом, рост объемной доли наполнителя приводит к увеличению расхождения между значениями диэлектрической проницаемости и электропроводности композитов, полученными на основе модели MPL, и результатами расчетов по пластинчатой модели ЕРМ и теории эффективной среды ЕМТ.

4.6.4 Расчет коэффициента отражения от неоднородного композита.

Основное преимущество разработанной многослойной модели *MPL* над моделями эффективной среды заключается в возможности её использования при описании взаимодействия электромагнитной волны с неоднородными композитами. Рассчитаем частотную зависимость коэффициента отражения от образца, в котором нити расположены ближе к центру волновода (рис. 4.16, а). На рис. 4.16 символом V_0 обозначен общий объем композита, V_A – участок волновода

с нитями, R_A – величина минимума коэффициента отражения в случае, когда нити расположены ближе к центру волновода (в объеме V_A), R_0 – величина минимума коэффициента отражения при однородном заполнении образца нитями, т.е. при $V_A = V_0$.

Величина минимума коэффициента отражения тем больше, чем сильнее включения стянуты к центру волновода (рис. 4.16, б). Это обусловлено тем, что в рассматриваемой области напряженность электрического поля СВЧ-волны принимает максимальное значение. Таким образом, модель MPL удалось применить для успешного теоретического описания экспериментально наблюдаемого возрастания минимума коэффициента отражения СВЧ-волны от неоднородного композита ЭС-МЖ-УНТ (рис. 4.16, в и рис. 3.5).

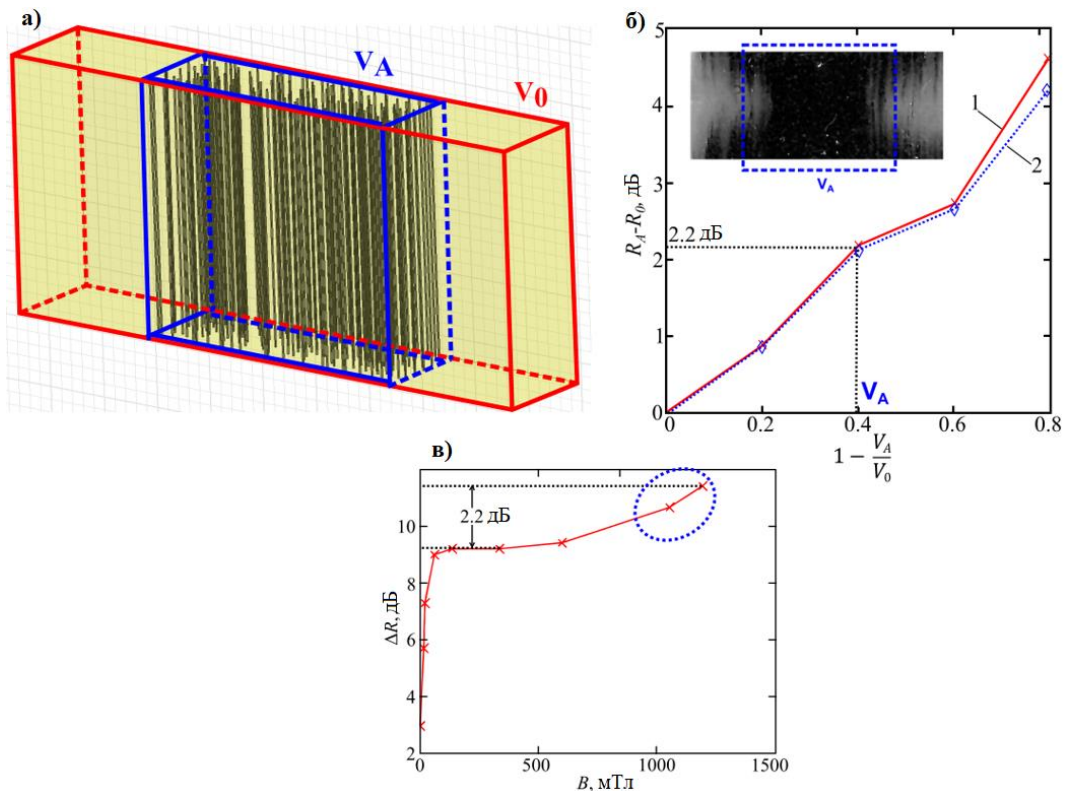


Рисунок 4.16 – Схематическое изображение неоднородного заполнения волновода (а), зависимость от приведенного объема разности величины минимумов коэффициента отражения при неоднородном и однородном заполнении (б) (на вставке представлена фотография образца) и экспериментально определенная зависимость разности минимумов коэффициента отражения ΔR от величины индукции магнитного поля (в) для образцов, полученных при полимеризации при наличии и отсутствии внешнего магнитного поля. Спектральные характеристики получены: 1 – моделированием в среде HFSS; 2 – численным расчетом в рамках «модели возмущенных слоев» (MPL).

Таким образом, была предложена физическая модель, названная моделью возмущенных слоев (MPL), в рамках которой заполненный диэлектриком с ориентированными нитями отрезок волновода представляется в виде многослойной структуры. Моделирование коэффициента отражения от рассматриваемой структуры реализуется с помощью метода матриц передачи, тогда как для нахождения постоянной распространения каждого слоя привлекается теория возмущений. Результаты расчета спектральных характеристик, полученные на основе модели возмущенных слоев (MPL), демонстрируют хорошее качественное и количественное согласие с данными численного моделирования методом конечных элементов в программном пакете ANSYS HFSS. Установлено, что при низких значениях объемной доли или комплексной диэлектрической проницаемости включений ошибка определения минимума коэффициента отражения не превышает 1%. Область применимости модели MPL распространяется на расчет структур, содержащих большое число нитевидных включений микронных размеров, тогда как альтернативные подходы к моделированию требуют как минимум на порядок больших временных затрат при толщине нитей менее 15 мкм

Определение электрофизических параметров композитов осуществлялось путем решения обратной задачи на основе анализа положения минимума коэффициента отражения СВЧ фотонной структуры с дефектом в виде исследуемого образца. Ошибка определения параметров в данном случае не превышает 1%.

Численное моделирование в рамках модели возмущенных слоев (MPL) в области высоких концентраций наполнителя ($v_c > 5\%$) обеспечивает пятикратное снижение погрешности определения диэлектрической проницаемости по сравнению с методом эффективной среды (EMT) в приближении вытянутых эллипсоидов. При малых объемных долях ($v_c < 1\%$) и значениях проводимости ($\sigma_c = 10 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$) упрощенная «пластинчатая модель» ЕРМ описывает электрофизические параметры композита с точностью того же порядка, что и модель возмущенных слоев MPL.

Кроме того, исследована применимость модели возмущенных слоев (MPL) для моделирования частотных зависимостей коэффициента отражения от композиционных материалов с пространственно-неоднородным распределением ориентированных нитей. Полученные результаты демонстрируют хорошее согласие с данными численного моделирования в среде ANSYS HFSS.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные выводы и результаты диссертации заключаются в следующем:

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, заполненного 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Композиционные материалы : справочник / В. В. Васильев, В. Д. Протасов, В. В. Болотин [и др.] ; под общей редакцией В. В. Васильева, Ю. М. Тарнопольского. – Москва : Машиностроение, 1990. – 512 с.
2. Shanmugasundram, H. P. A comprehensive review on dielectric composites: Classification of dielectric composites / H. P. Shanmugasundram, E. Jayamani, K. H. Soon // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2022. – Vol. 157. – P. 112075. – DOI: 10.1016/j.rser.2022.112075.
3. Cui, L. A review on recent advances in carbon-based dielectric system for microwave absorption / L. Cui, X. Han, F. Wang [et al.] // *Journal of Materials Science*. – 2021. – Vol. 56, № 18. – P. 10782–10811. – DOI: 10.1007/s10853-021-05941-y.
4. Elbakyan, L. Composite Nanomaterials Based on Polymethylmethacrylate Doped with Carbon Nanotubes and Nanoparticles: A Review / L. Elbakyan, I. Zaporotskova // *Polymers*. – 2024. – Vol. 16, № 9. – P. 1242. – DOI: 10.3390/polym16091242.
5. Arijit, S. Recent Progress in CNT-Reinforced Composite and FGM for Multifunctional Space Applications and Future Directions / S. Arijit, M. Gurudas, B. Arindam [et al.] // *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D*. – 2024. – Vol. 105, № 1. – P. 527–541. – DOI: 10.1007/s40033-023-00465-y.
6. Xu, B. Recent Progress and Challenges Regarding Carbon Nanotube On-Chip Interconnects / B. Xu, R. Chen, J. Zhou, J. Liang // *Micromachines*. – 2022. – Vol. 13, № 7. – P. 1148. – DOI: 10.3390/mi13071148.
7. Stergiou, C. A. Hybrid polymer composites for electromagnetic absorption in electronic industry / C. A. Stergiou, M. Y. Koledintseva, K. N. Rozanov // *Hybrid Polymer Composite Materials: Applications*. – Elsevier Inc., 2017. – P. 53–106. – DOI: 10.1016/B978-0-08-100785-3.00003-6.
8. Kolosov, D. A. Thin graphene–nanotube films for electronic and photovoltaic devices: DFTB modeling / D. A. Kolosov, V. V. Mitrofanov, M. M. Slepchenkov, O. E.

Glukhova // *Membranes*. – 2020. – Vol. 10, № 11. – P. 1–14. – DOI: 10.3390/membranes10110341.

9. Левицкий, С. Г. Энергонезависимая троичная ячейка памяти на основе углеродного нанокompозита : патент 2795746 Российская Федерация : МПК G11C 11/00 / С. Г. Левицкий, В. В. Шунаев, О. Е. Глухова ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского». – № 2022134295 ; заявл. 26.12.2022 ; опубл. 11.05.2023, Бюл. № 14.

10. Vales-Pinzón, C. Polarized light transmission in ferrofluids loaded with carbon nanotubes in the presence of a uniform magnetic field / C. Vales-Pinzón, J. J. Alvarado-Gil, R. Medina-Esquivel, P. Martínez-Torres // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2014. – Vol. 369. – P. 114–121. – DOI: 10.1016/j.jmmm.2014.06.025.

11. Wu, H. Permittivity controllable CNTs/PI composite aerogels with oriented microchannels for advanced microwave absorption and thermal isolation / H. Wu, X. Ren, W. Hu [et al.] // *Carbon*. – 2025. – Vol. 233. – P. 119883. – DOI: 10.1016/j.carbon.2024.119883.

12. Zhou, J. Effect of lay-up configuration on the microwave absorption properties of carbon fiber reinforced polymer composite materials / J. Zhou, Y. Li, M. Zhang [et al.] // *Materials Today Communications*. – 2021. – Vol. 26. – P. 101960. – DOI: 10.1016/j.mtcomm.2020.101960.

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

14. Усанов, Д. А. Влияние отжига на СВЧ-характеристики углеродных нанотрубок и нанокompозитных материалов, созданных на их основе / Д. А. Усанов, А. В. Скрипаль, А. В. Романов // *ЖТФ*. – 2014. – Т. 84, № 6. – С. 86–91.

15. Rozanov, K. N. The effect of shape distribution of inclusions on the frequency dependence of permeability in composites / K. N. Rozanov, A. V. Osipov, D. A. Petrov

[et al.] // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2009. – Vol. 321, № 7. – P. 738–741. – DOI: 10.1016/j.jmmm.2008.11.039.

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

17. Розенцвейг, Р. Феррогидродинамика / Р. Розенцвейг ; перевод с английского под редакцией В. Г. Баштового. – Москва : Мир, 1989. – 366 с.

18. Шлиомис, М. И. Магнитные жидкости / М. И. Шлиомис // УФН. – 1974. – Т. 112, вып. 3. – С. 427–458.

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

20. Диканский, Ю. И. Особенности устойчивости микрокапельной структуры магнитной жидкости в электрическом и магнитном полях / Ю. И. Диканский, О. А. Нечаева // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. Приложение. – 2004. – № 6. – С. 37–41.

21. Диканский, Ю. И. Динамика немагнитной капли, взвешенной в магнитной жидкости, во вращающемся магнитном поле / Ю. И. Диканский, А. Р. Закинян // ЖТФ. – 2010. – Т. 80, вып. 8. – С. 8–12.

22. Filipcsei, G. Magnetic Field-Responsive Smart Polymer Composites / G. Filipcsei, I. Csetneki, A. Szilágyi, M. Zrínyi // *Adv Polym Sci*. – 2007. – Vol. 206. – P. 137–189. – DOI: 10.1007/12_2006_104.

23. Ogbonna, V. E. A review on recent advances on the mechanical and conductivity properties of epoxy nanocomposites for industrial applications / V. E. Ogbonna, A. P. I. Popoola, O. M. Popoola // *Polymer Bulletin*. – 2023. – Vol. 80. – P. 3449–3487. – DOI: 10.1007/s00289-022-04249-4.

24. Воробьева, Е. А. Проводимость в композитных материалах на основе ориентированных углеродных нанотрубок / Е. А. Воробьева, А. П. Евсеев, В. Л. Петров [и др.] // ВМУ. Серия 3. Физика. Астрономия. – 2021. – № 1. – С. 23–29.

25. Князьков, Р. А. Стеклометаллический порошковый ферромагнитный материал для применения в композитах, предназначенных для СВЧ диапазона / Р. А. Князьков, С. Н. Старостенко, А. В. Артемова, И. В. Комаров, А. В. Долматов, А. О. Ширяев, П. А. Иванов., А. В. Осипов, Д. А. Петров, С. А. Маклаков, П. А. Зезюлина, Н. А. Бузников, С. С. Маклаков // Современная электродинамика. – 2024. – № 4 (12). – С. 21–29. – DOI: 10.24412/2949-0553-2024-412-21-29.

26. Любченков, А. В. Анализ методов измерения электродинамических параметров / А. В. Любченков // Вестник ВГТУ. – 2009. – № 9.

27. Shiryayev, A. O. Experimental study of microwave magnetic properties of composites under magnetic bias / A. O. Shiryayev, K. N. Rozanov, A. V. Artemova [et al.] // 2021 IEEE International Magnetic Conference (INTERMAG). – 2021. – DOI: 10.1109/INTERMAG42984.2021.9579504.

28. Усанов, Д. А. Одномерные СВЧ фотонные кристаллы. Новый области применения / Д. А. Усанов, С. А. Никитов, А. В. Скрипаль, Д. В. Пономарев. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2018. – 184 с.

29. Царев, В. А. Миниатюрные двухззорные фотонно-кристаллические резонаторы с фрактальными резонансными элементами, выполненными на печатной плате / В. А. Царев, А. Ю. Мирошниченко, А. В. Гнусарев [и др.] // Радиотехника. – 2020. – Т. 84, № 7 (14). – С. 41–49. – DOI: 10.18127/j00338486-202007(14)-06.

30. Скрипаль, А. В. Дефектные моды фотонного кристалла с проводящим нанослоем на изолирующей подложке / А. В. Скрипаль, Д. В. Пономарев, В. Е. Шаронов // ЖТФ. – 2025. – Т. 95, вып. 1. – С. 150–158.

31. Радченко, Д. П. Моделирование радиопоглощающих свойств пиролизованного полиакрилонитрила в диапазоне частот от 3 до 50 ГГц / Д. П. Радченко, И. В. Запороцкова, Л. В. Кожитов [и др.] // Известия вузов. Материалы электронной техники. – 2023. – Т. 26, № 4. – С. 300–308.

32. Элбакян, Л. С. Исследование проводящих свойств композитных полимерных материалов на основе поливинилпирролидона, допированных одно- и двухслойными нанотрубками / Л. С. Элбакян, И. В. Запороцкова // Известия

Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. – 2025. – Т. 25, вып. 4. – С. 495–504.

33. Графен-нанотрубные композиты: математическое моделирование / О. Е. Глухова, В. Н. Гусятников, М. В. Давидович [и др.]. – Москва : Русайнс, 2021. – 140 с.

34. Постельга, А. Э. Модуляция лазерного излучения суспензией углеродных нанотрубок в магнитной жидкости / А. Э. Постельга, С. В. Игонин, Т. С. Бочкова [и др.] // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. – 2024. – Т. 24, № 2. – С. 171–179.

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

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

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

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

39. Усанов, Д. А. Применение теории возмущений для решения обратной задачи по определению параметров магнитной жидкости с учетом агломератов

ферромагнитных наночастиц / Д. А. Усанов, А. Э. Постельга, Т. С. Бочкова, С. В. Игонин // Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами : сборник статей пятой Всероссийской научной школы-семинара / под редакцией Д. А. Усанова. – Саратов : Саратовский источник, 2018. – С. 126–129.

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

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

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

43. Постельга, А. Э. Применение управляемого магнитным полем фотонного кристалла СВЧ-диапазона для определения параметров мелкодисперсных сред / А. Э. Постельга, Ал. В. Скрипаль, С. В. Игонин, Е. П. Простак // Взаимодействие

сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами : сборник статей восьмой Всероссийской научной школы-семинара / под редакцией Ал. В. Скрипаля. – Саратов : Саратовский источник, 2021. – С. 126–129.

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

45. Постельга, А. Э. Особенности отражения СВЧ-излучения от композита эпоксидная смола – магнитная жидкость – углеродные нанотрубки / А. Э. Постельга, С. В. Игонин // Нанотехнологии и наноматериалы: современное состояние и перспективы развития : сборник тезисов IV Международной научно-технической конференции. – Волгоград, 2024. – С. 30–32.

46. Постельга, А. Э. Анизотропия коэффициента отражения СВЧ излучения от композита эпоксидная смола – магнитная жидкость – углеродные нанотрубки / А. Э. Постельга, С. В. Игонин, Ю. А. Агапова // Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами : сборник статей одиннадцатой Всероссийской научной школы-семинара / под редакцией Ал. В. Скрипаля. – Саратов : Саратовский источник, 2024. – С. 174–176.

47. Постельга, А. Э. Модель волокнистого композита для расчета частотной зависимости коэффициента отражения СВЧ излучения / А. Э. Постельга, С. В. Игонин, Ю. А. Агапова // Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами : сборник статей двенадцатой Всероссийской

научной школы-семинара / под редакцией Ал. В. Скрипаля. – Саратов : Саратовский источник, 2025. – С. 209–212.

48. Iijima, S. Helical microtubules of graphitic carbon / S. Iijima // *Nature*. – 1991. – Vol. 354. – P. 56–58. – DOI: 10.1038/354056a0.

49. Ghasempour, R. CNT Basics and Characteristics / R. Ghasempour, H. Hamid Narei // *Carbon nanotube-reinforced polymers*. – Elsevier, 2018. – P. 1–24. – DOI: 10.1016/C2016-0-00371-6.

50. Wang, X. Fabrication of Ultralong and Electrically Uniform Single-Walled Carbon Nanotubes on Clean Substrates / X. Wang, Q. Li, J. Xie [et al.] // *Nano Letters*. – 2009. – Vol. 9, № 9. – P. 3137–3141. – DOI: 10.1021/nl901260b.

51. Дьячков, П. Н. Электронные свойства и применение нанотрубок / П. Н. Дьячков. – Москва : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010. – 488 с.

52. Walt, A. de Heer. Aligned Carbon Nanotube Films: Production and Optical and Electronic Properties / A. de Heer Walt, W. S. Bacsa, A. Chatelain [et al.] // *Science*. – 1995. – Vol. 268. – P. 845–847. – DOI: 10.1126/science.268.5212.845.

53. Moghaddam, H. K. Application of carbon nanotubes(CNT) on the computer science and electrical engineering: a review / H. K. Moghaddam, M. R. Maraki, A. Rajaei // *IJRES*. – 2020. – Vol. 9, № 1. – P. 61–82.

54. Ijaz, H. Review on carbon nanotubes (CNTs) and their chemical and physical characteristics, with particular emphasis on potential applications in biomedicine / H. Ijaz, A. Mahmood, M. M. Abdel-Daim [et al.] // *Inorganic Chemistry Communications*. – 2023. – Vol. 155. – P. 111020. – DOI: 10.1016/j.inoche.2023.111020.

55. Bulmer, J. S. A meta-analysis of conductive and strong carbon nanotube materials / J. S. Bulmer, A. Kaniyoor, J. A. Elliott // *Adv. Mater.* – 2021. – Vol. 33, № 21. – P. 2008432. – DOI: 10.1002/adma.202008432.

56. Mohd Nurazzi, N. Fabrication, Functionalization, and Application of Carbon Nanotube-Reinforced Polymer Composite: An Overview / N. Mohd Nurazzi, M. R. M. Asyraf, A. Khalina [et al.] // *Polymers*. – 2021. – Vol. 13, № 7. – P. 1047. – DOI: 10.3390/polym13071047.

57. Felicia, L. J. Magnetorheological properties of a magnetic nanofluid with dispersed carbon nanotubes / L. J. Felicia, J. Philip // *Physical Review E*. – 2014. – Vol. 89, № 2. – P. 022310. – DOI: 10.1103/PhysRevE.89.022310.

58. Ali, Z. Critical review on the characterization, preparation, and enhanced mechanical, thermal, and electrical properties of carbon nanotubes and their hybrid filler polymer composites for various applications / Z. Ali, S. Yaqoob, J. Yu, A. D'Amore // *Composites Part C: Open Access*. – 2024. – Vol. 13. – P. 100434. – DOI: 10.1016/j.jcomsc.2024.100434.

59. Иржак, В. И. Эпоксидные композиционные материалы с углеродными нанотрубками / В. И. Иржак // *Успехи химии*. – 2011. – Т. 80, № 8. – С. 821–840.

60. Kurita, H. Load-bearing contribution of multi-walled carbon nanotubes on tensile response of aluminum / H. Kurita, M. Estili, H. Kwon [et al.] // *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* – 2015. – Vol. 68. – P. 133–139. – DOI: 10.1016/j.compositesa.2014.09.014.

61. Kumar, A. Recent progress and future perspectives on carbon-nanomaterial-dispersed liquid crystal composites / A. Kumar, D. P. Singh, G. Singh // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2021. – Vol. 55, № 8. – P. 083002. – DOI: 10.1088/1361-6463/ac2ced.

62. Lu, H. Enhanced thermal conductivity of free-standing 3D hierarchical carbon nanotube-graphene hybrid paper / H. Lu, J. Zhang, J. Luo [et al.] // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. – 2017. – Vol. 102. – P. 1–8. – DOI: 10.1016/j.compositesa.2017.07.021.

63. Allaoui, A. Mechanical and electrical properties of a MWNT/epoxy composite / A. Allaoui, S. Bai, H. M. Cheng, J. B. Bai // *Composites Science and Technology*. – 2022. – Vol. 62. – P. 1993–1998. – DOI: 10.1016/S0266-3538(02)00129-X.

64. Wang, Q. The effects of CNT alignment on electrical conductivity and mechanical properties of SWNT/epoxy nanocomposites / Q. Wang, J. Dai, W. Li [et al.] // *Composites Science and Technology*. – 2008. – Vol. 68. – P. 1644–1648. – DOI: 10.1016/j.compscitech.2008.02.024.

65. Wang, Z. Modeling the percolation behavior of conductive particles/insulating polymer-based composites with equivalent circuit of resistance / Z. Wang, J. Zhang, G. J. Weng // *Polymer*. – 2025. – Vol. 324. – P. 128262. – DOI: 10.1016/j.polymer.2025.128262.

66. Chen, X. Recent advances in carbon nanotubes-based microwave absorbing composites / X. Chen, H. Liu, D. Hu [et al.] // *Ceramics International*. – 2021. – Vol. 47, № 17. – P. 23749–23761. – DOI: 10.1016/j.ceramint.2021.05.219.

67. Kumar, R. Recent progress on carbon-based composite materials for microwave electromagnetic interference shielding / R. Kumar, S. Sahoo, E. Joanni [et al.] // *Carbon*. – 2021. – Vol. 177. – P. 304–331. – DOI: 10.1016/j.carbon.2021.02.091.

68. Cai, Y. Structure Design, Surface Modification, and Application of CNT Microwave-Absorbing Composites / Y. Cai, H. Yu, L. Cheng [et al.] // *Advanced Sustainable Systems*. – 2023. – Vol. 7, № 12. – P. 2300272. – DOI: 10.1002/adsu.202300272.

69. Wu, H. Permittivity controllable CNTs/PI composite aerogels with oriented microchannels for advanced microwave absorption and thermal isolation / H. Wu, X. Ren, W. Hu [et al.] // *Carbon*. – 2025. – Vol. 233. – P. 119883. – DOI: 10.1016/j.carbon.2024.119883.

70. Wang, S. Microwave absorption properties of polymer-derived SiCN(CNTs) composite ceramics / S. Wang, H. Gong, Y. Zhang, M. Z. Ashfaq // *Ceramics International*. – 2021. – Vol. 47, № 1. – P. 1294–1302. – DOI: 10.1016/j.ceramint.2020.08.250.

71. Yuan, X. In-situ construction of CNTs/laterite composites for enhanced microwave absorption / X. Yuan, L. Wan, R. Fu [et al.] // *Diamond and Related Materials*. – 2023. – Vol. 140, pt. B. – P. 110490. – DOI: 10.1016/j.diamond.2023.110490.

72. Singh, B. P. Enhanced microwave shielding and mechanical properties of high loading MWCNT–epoxy composites / B. P. Singh, P. V. Choudhary, P. Saini [et al.] // *J Nanopart Res*. – 2013. – Vol. 15. – P. 1554. – DOI: 10.1007/s11051-013-1554-0.

73. Silva, V. A. S-parameters, electrical permittivity, and absorbing energy measurements of carbon nanotubes-based composites in X-band / V. A. Silva, M. C.

Rezende // J Appl Polym Sci. – 2020. – Vol. 138, № 7. – P. e49843. – DOI: 10.1002/app.49843.

74. Thole, D. Preparation and characterization of metal oxide/carbon nanotube nanocomposites for photocatalytic and photo-electrocatalytic hydrogen production: A review / D. Thole, S. Balogun, K. Modibane [et al.] // International Journal of Electrochemical Science. – 2025. – Vol. 20. – P. 100929. – DOI: 10.1016/j.ijoes.2025.100929.

75. Saib, A. Carbon nanotube composites for broadband microwave absorbing materials / A. Saib, L. Bednarz, R. Daussin [et al.] // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2006. – Vol. 54, № 6. – DOI: 10.1109/TMTT.2006.874889.

76. Kim, J. B. Comparison study on the effect of carbon nano materials for single-layer microwave absorbers in X-band / J. B. Kim, S. K. Lee, C. G. Kim. // Composites Science and Technology. – 2008. – Vol. 68. – P. 2909–2916. – DOI: 10.1016/j.compscitech.2007.10.035.

77. Song, Y. S. Influence of dispersion states of carbon nanotubes on physical properties of epoxy nanocomposites / Y. S. Song, J. R. Youn // Carbon. – 2005. – Vol. 43. – P. 1378–1385. – DOI: 10.1016/j.carbon.2005.01.007.

78. Ferrara, M. Influence of the electrical field applied during thermal cycling on the conductivity of LLDPE/CNT composites / M. Ferrara, H. Neitzert, M. Sarno [et al.] // Physica E. – 2007. – Vol. 37. – P. 66–71. – DOI: 10.1016/j.physe.2006.10.008.

79. Camponeschi, E. Properties of carbon nanotube–polymer composites aligned in magnetic field / E. Camponeschi, R. Vance, M. Al-Haik [et al.] // Carbon. – 2007. – Vol. 45. – P. 2037–2046. – DOI: 10.1016/j.carbon.2007.05.024.

80. Li, Y. Controllable modification of helical carbon nanotubes for high-performance microwave absorption / Y. Li, Z. Xu, A. Jia [et al.] // Nanotechnology Reviews. – 2021. – Vol. 10. – P. 671–679. – DOI: 10.1515/ntrev-2021-0045.

81. Усанов, Д. А. Комплексная диэлектрическая проницаемость композитов на основе диэлектрических матриц и входящих в их состав углеродных нанотрубок / Д. А. Усанов, А. В. Скрипаль, А. В. Романов // ЖТФ. – 2011. – Т. 81, вып. 1. – С. 106–110.

82. Sun, H. Cross-stacking aligned carbon-nanotube films to tune microwave absorption frequencies and increase absorption intensities / H. Sun, R. Che, X. You [et al.] // *Adv Mater.* – 2014. – Vol. 26, № 48. – P. 8120–8125. – DOI: 10.1002/adma.201403735.

83. Russell, J. M. Alignment of nematic liquid crystals using carbon nanotube films / J. M. Russell, S. Oh, I. LaRue [et al.] // *Thin Solid Films.* – 2006. – Vol. 509. – P. 53–57. – DOI: 10.1016/j.tsf.2005.09.099.

84. Romyen, N. Alignment of Carbon Nanotubes in Polyimide Under Electric and Magnetic Fields / N. Romyen, S. Thongyai, P. Praserttham // *Journal of Applied Polymer Science.* – 2012. – Vol. 123. – P. 3470–3475. – DOI: 10.1002/app.34692.

85. Sen, R. Preparation of single-walled carbon nanotube reinforced polystyrene and polyurethane nanofibers and membranes by electrospinning / R. Sen, B. Zhao, D. Perea [et al.] // *Nano Letters.* – 2004. – Vol. 4, № 3. – P. 459–464. – DOI: 10.1021/nl035135s.

86. Fan, Z. Characterization of orientation state of carbon nanotubes in shear flow / Z. Fan, S. G. Advani // *Polymer.* – 2005. – Vol. 46. – P. 5232–5240. – DOI: 10.1016/j.polymer.2005.04.008.

87. Zhao, D.-L. Preparation and electromagnetic and microwave absorbing properties of Fe-filled carbon nanotubes / D.-L. Zhao, X. Li, Z.-M. Shen // *J. Alloys Compd.* – 2009. – Vol. 471. – P. 457–460. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2008.03.127.

88. Hekmatara, H. Microwave absorption property of aligned MWCNT/Fe₃O₄ / H. Hekmatara, M. Seifi, K. Forooghi // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials.* – 2013. – Vol. 346. – P. 186–191. – DOI: 10.1016/j.jmmm.2013.06.032.

89. Kim, I. T. Anisotropic conductivity of magnetic carbon nanotubes embedded in epoxy matrices / I. T. Kim, A. Tannenbaum, R. Tannenbaum // *Carbon.* – 2011. – Vol. 49. – P. 54–61. – DOI: 10.1016/j.carbon.2010.08.041.

90. Philip, J. Magnetic nanofluids (Ferrofluids) Recent advances, applications, challenges, and future directions / J. Philip // *Advances in Colloid and Interface Science.* – 2023. – Vol. 311. – P. 102810. – DOI: 10.1016/j.cis.2022.102810.

91. Dotsenko, O. A. The effect of external magnetic field on dielectric permeability of multiphase ferrofluids / O. A. Dotsenko, A. A. Pavlova, V. S. Dotsenko // *Russian Physics Journal*. – 2018. – Vol. 60, № 11. – P. 1955–1960. – DOI: 10.1007/s11182-018-1308-7.
92. Вивчарь, В. И. Спектры оптических эффектов в магнитных жидкостях, содержащих агрегаты наночастиц / В. И. Вивчарь, К. В. Ерин // *Оптика и спектроскопия*. – 2024. – Т. 132, вып. 3. – С. 335–341. – DOI: 10.61011/OS.2024.03.58154.6046-23.
93. Tufaile, A. Observing dynamical systems using magneto-controlled diffraction / A. Tufaile, T. A. Vanderelli, M. Snyder, A. P. B. Tufaile // *Condens. Matter*. – 2019. – Vol. 4, № 2. – P. 35. – DOI: 10.3390/condmat4020035.
94. Lim, E. W. C. Agglomeration of magnetic nanoparticles / E. W. C. Lim, R. Feng // *J. Chem. Phys.* – 2012. – Vol. 136. – P. 124109. – DOI: 10.1063/1.3697865.
95. Гехт, Р. С. Магнитный резонанс в изотропном суперпарамагнетике / Р. С. Гехт, В. А. Игнатченко, Ю. Л. Райхер, М. И. Шлиомис // *ЖЭТФ*. – 1976. – Т. 70. – С. 1300–1311.
96. Nimisha, O. K. Magneto-optical studies of kerosene based ferrofluid / O. K. Nimisha, K. Pradeesh, A. P. Reena Mary // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2021. – Vol. 2312. – P. 012070. – DOI: 10.1088/1742-6596/2312/1/012070.
97. Philip, J. Optical Properties and Applications of Ferrofluids - A Review / J. Philip, J. M. Laskar // *J. Nanofluids*. – 2012. – Vol. 1, № 1. – P. 3–20. – DOI: 10.1166/jon.2012.1002.
98. Ерин, К. В. Спектры эффектов магнитного двойного лучепреломления и дихроизма в магнитных коллоидах с различным размером частиц / К. В. Ерин, В. И. Вивчарь, Е. И. Шевченко // *Известия РАН. Серия физическая*. – 2023. – Т. 87, № 3. – С. 315–320. – DOI: 10.31857/S0367676522700557.
99. Jing, Dengwei. Magneto-optical transmission in magnetic nanoparticle suspensions for different optical applications: A review / Dengwei Jing, Le Sun, Jingyu Jin [et al.] // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 2021. – Vol. 54, № 1. – P. 013001. – DOI: 10.1088/1361-6463/abb8fd.

100. Усанов, Д. А. Модуляция поляризованного оптического излучения, проходящего через магнитную жидкость с нанотрубками, при воздействии магнитного поля с изменяющимся направлением / Д. А. Усанов, А. Э. Постельга, Т. С. Бочкова, В. Н. Гаврилин, С. В. Игонин // ЖТФ. – 2017. – Т. 87, № 6. – С. 1432–1435.

101. Tarjanyí, N. Dichromatic properties of a magnetic fluid thin layer / N. Tarjanyí, D. Kacik // Optik - International Journal for Light and Electron Optics. – 2021. – Vol. 244. – P. 167562. – DOI: 10.1016/j.ijleo.2021.167562.

102. Jin, J. Time-dependent scattering of incident light of various wavelengths in ferrofluids under external magnetic field / J. Jin, D. Song, J. Geng, D. Jing // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2018. – Vol. 447. – P. 124–133. – DOI: 10.1016/j.jmmm.2017.09.066.

103. Akyurekli, M. Investigation of optical properties of ferrofluid by using magneto-optical transmission and linear dichroism / M. Akyurekli, M. Gonulol, A. Bayram [et al.] // IEEE 7th International Conference Nanomaterials: Application & Properties (NAP). – 2017. – P. 02MAN10-1–02MAN10-4. – DOI: 10.1109/NAP.2017.8190355.

104. Chand, M. Reversible, voluminous and tunable patterning of multiwalled carbon nanotubes in ferrofluid: Partial or complete? / M. Chand, A. Shankar, Annveer [et al.] // Applied Surface Science. – 2022. – Vol. 604. – P. 154283. – DOI: 10.1016/j.apsusc.2022.154283.

105. Yavari, M. Controlled assembly and alignment of CNTs in ferrofluid: Application in tunable heat transfer / M. Yavari, Z. Mansourpour, M. Shariaty-Niassar // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2019. – Vol. 479. – P. 170–178. – DOI: 10.1016/j.jmmm.2019.01.078.

106. Павлова, А. А. Магнитные жидкости с управляемыми экранирующими характеристиками на основе магнетита и многослойных углеродных нанотрубок / А. А. Павлова, В. И. Сусяев, Е. Ю. Коровин, Д. А. Мазиллов // Технологии безопасности жизнедеятельности. – 2024. – № 8. – С. 67–74. – DOI: 10.17223/29491665/8/9.

107. Zakinyan, A. Drops deformation and magnetic permeability of a ferrofluid emulsion / A. Zakinyan, Y. Dikansky // *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects.* – 2011. – Vol. 380. – P. 314–318. – DOI: 10.1016/j.colsurfa.2011.03.018.

108. Ivey, M. Magnetic-field-induced structural transitions in a ferrofluid emulsion / M. Ivey, J. Liu, Y. Zhu, S. Cutillas // *Physical Review E.* – 2000. – Vol. 63. – P. 011403. – DOI: 10.1103/PhysRevE.63.011403.

109. Туркин, С. Д. Особенности отражения электромагнитных волн СВЧ-диапазона от магнитных коллоидов / С. Д. Туркин, Ю. И. Диканский // *ЖТФ.* – 2021. – Т. 91, вып. 1. – С. 131–138. – DOI: 10.21883/JTF.2021.01.50285.125-20.

110. Crainic, Nicolae. Magnetic nanocomposite materials obtained using magnetic nano fluids and resins / Nicolae Crainic, D. Bica, N. C. Popa [et al.] // *Int. J. Nanomanufacturing.* – 2010. – Vol. 6. – P. 350–361. – DOI: 10.1504/IJNM.2010.034796.

111. Усанов, Д. А. Резонансное отражение СВЧ излучения от магнитной жидкости / Д. А. Усанов, А. В. Скрипаль, С. А. Ермолаев // *Письма в ЖТФ.* – 1993. – Т. 19, № 16. – С. 47–50.

112. Wang, J. Investigation of percolation theory and permittivity model with one-dimensional fillers / J. Wang, J. Wang, S. Qi [et al.] // *Europhysics Letters.* – 2017. – Vol. 117, № 1. – P. 17001. – DOI: 10.1209/0295-5075/117/17001.

113. Wang, S. Evaluation and modeling of electrical conductivity in conductive polymer nanocomposite foams with multiwalled carbon nanotube networks / S. Huang, Y. Chang, E. Chang [et al.] // *Chem. Eng. J.* – 2021. – Vol. 411. – P. 128382. – DOI: 10.1016/j.cej.2020.128382.

114. Yakovenko, O. S. Complex permittivity of polymer-based composites with carbon nanotubes in microwave band / O. S. Yakovenko, L. Yu. Matzui, L. L. Vovchenko [et al.] // *Appl Nanosci.* – 2020. – Vol. 10. – P. 2691–2697. – DOI: 10.1007/s13204-019-01083-5.

115. *Advanced Materials.* – 2013. – Vol. 25, № 44. – P. 6334–6365. – DOI: 10.1002/adma.201301752.

116. Gbaguidi, Audrey. Stochastic percolation model for the effect of nanotube agglomeration on the conductivity and piezoresistivity of hybrid nanocomposites /

Audrey Gbaguidi, Sirish Namilae, Daewon Kim // *Computational Materials Science*. – 2019. – Vol. 166. – P. 9–19. – DOI: 10.1016/j.commatsci.2019.04.045.

117. Zheng, Q.-S. An explicit and universally applicable estimate for the effective properties of multiphase composites which accounts for inclusion distribution / Q.-S. Zheng, D. X. Du // *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. – 2001. – Vol. 49. – P. 2765–2788. – DOI: 10.1016/S0022-5096(01)00078-3.

118. Deng, F. An analytical model of effective electrical conductivity of carbon nanotube composites / F. Deng, Q.-S. Zheng // *Appl. Phys. Lett.* – 2008. – Vol. 92. – P. 071902. – DOI: 10.1063/1.2857468.

119. Khan, S. U. Effects of carbon nanotube alignment on electrical and mechanical properties of epoxy nanocomposites / S. U. Khan, J. R. Pothnis, J.-K. Kim // *Composites: Part A*. – 2013. – Vol. 49. – P. 26–34. – DOI: 10.1016/j.compositesa.2013.01.015.

120. Gong, S. Anisotropic electrical conductivity of polymer composites with aligned carbon nanotubes / S. Gong, Z. H. Zhu, S. Meguid // *Polymer*. – 2015. – Vol. 56. – P. 498–506. – DOI: 10.1016/j.polymer.2014.11.038.

121. Tang, Z.-H. A new analytical model for predicting the electrical conductivity of carbon nanotube nanocomposites / Z.-H. Tang, Y.-Q. Li, P. Huang [et al.] // *Composites Communications*. – 2021. – Vol. 23. – P. 100577. – DOI: 10.1016/j.coco.2020.100577.

122. Jang, S. H. Effective electrical conductivity of carbon nanotube-polymer composites: a simplified model and its validation / S. H. Jang, H. Yin // *Mater. Res. Express*. – 2015. – Vol. 2. – P. 045602. – DOI: 10.1088/2053-1591/2/4/045602.

123. Gong, S. Anisotropic electrical conductivity of polymer composites with aligned carbon nanotubes / S. Gong, Z. H. Zhu, S. Meguid // *Polymer*. – 2015. – Vol. 56. – P. 498–506. – DOI: 10.1016/j.polymer.2014.11.038.

124. Апресян, Л. А. О модели эффективной среды для частиц со сложной структурой / Л. А. Апресян, Д. В. Власов, Д. А. Задорин, В. И. Красовский // *ЖТФ*. – 2017. – Т. 87, вып. 1. – С. 10–17. – DOI: 10.1134/S1063784217010029.

125. Looyenga, H. Dielectric constants of heterogeneous mixtures / H. Looyenga // *Physica*. – 1965. – Vol. 31. – P. 401–406. – DOI: 10.1016/0031-8914(65)90045-5.

126. Nelson, S.O. Correlating dielectric properties of solids and particulate samples through mixture relationships / S. O. Nelson // *Transactions of the ASAE*. – 1992. – Vol. 35, № 2. – P. 625–629. – DOI: 10.13031/2013.28642.

127. Кац, Г. С. Наполнители для полимерных композиционных материалов / Г. С. Кац, Д. В. Милевски. – Москва : Химия, 1981. – 736 с.

128. Lagarkov, A. N. Dielectric properties of fiber-filled composites / A. N. Lagarkov, S. M. Matytsin, K. N. Rozanov, A. K. Sarychev // *Journal of Applied Physics*. – 1998. – Vol. 84. – P. 3806. – DOI: 10.1063/1.368559.

129. Xu, X. Effective properties of fiber composite materials / X. Xu, A. Qing, Y. B. Gan, Y. P. Feng // *J. of Electromagn. Waves and Appl.* – 2003. – Vol. 18, № 5. – P. 649–662. – DOI: 10.1163/156939304774114682.

130. Seo, D.-W. The effect of fiber orientation distribution on the effective permittivity of fiber composite materials / D.-W. Seo, H.-J. Kim, K.-U Bae, N.-H. Myung // *J. of Electromagn. Waves and Appl.* – 2010. – Vol. 24. – P. 2419–2430. – DOI: 10.1163/156939310793675835.

131. Lagarkov, A. N. High-frequency behavior of magnetic composites / A. N. Lagarkov, K. N. Rozanov // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2009. – Vol. 321, № 14. – P. 2082–2092. – DOI: 10.1016/j.jmmm.2008.08.099.

132. Pradeep, L. Effect of interphase permittivity on the electric field distribution of epoxy nanocomposites / L. Pradeep, A. Nelson, P. Preetha // *AIP Conference Proceedings*. – 2018. – Vol. 1966. – P. 020006. – DOI: 10.1063/1.5038685.

133. Katsounaros, A. Microwave characterization of vertically aligned multiwalled carbon nanotube arrays / A. Katsounaros, K. Z. Rajab, Y. Hao [et al.] // *Applied Physics Letters*. – 2011. – Vol. 98. – P. 203105. – DOI: 10.1063/1.359226.

134. Akhtar, M. J. Microwave effective permittivity of the layered dielectrics and composites using the nonlinear mixing model / M. J. Akhtar, H. B. Baskey, P. Ghising, N. M. Krishna // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. – 2015. – Vol. 22, № 3. – P. 1702–1710. – DOI: 10.1109/TDEI.2014.004808.

135. Krupka, J. Microwave Measurements of Electromagnetic Properties of Materials / J. Krupka // *Materials*. – 2021. – Vol. 14. – P. 5097. – DOI: 10.3390/ma14175097.

136. Фомин, Д. Г. Анализ методов измерения диэлектрических свойств материалов в СВЧ диапазоне длин волн / Д. Г. Фомин, Н. В. Дударев, С. Н. Даровских // *Журнал радиоэлектроники*. – 2021. – № 6. – DOI: 10.30898/1684-1719.2021.6.6.

137. Певнева, Н. А. Метод свободного пространства с использованием векторного анализатора цепей для определения диэлектрической проницаемости материалов на сверхвысоких частотах / Н. А. Певнева, А. Л. Гурский, А. М. Кострикин // *Доклады БГУИР*. – 2019. – № 4. – С. 32–39.

138. Uddin, A. Design and validation of an automated and remote free space measurement system for nondestructive testing of fiber composites / A. Uddin, D. Estevez, H.-X. Peng, F. Qin // *Materials Today Nano*. – 2024. – Vol. 28. – P. 100521. – DOI: 10.1016/j.mtnano.2024.100521.

139. Панарина, Т. М. Измеритель диэлектрической проницаемости / Т. М. Панарина // *Прикладная электродинамика, фотоника и живые системы-2019 : материалы VI Международной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, Казань, 18–20 апреля 2019 г. / под редакцией А. А. Иванова, Д. Е. Шаронова. – Казань : ИП Сагиев А. Р., 2019. – С. 190–193.*

140. Kobayashi, Y. Microwave measurement of dielectric properties of low-loss materials by the dielectric rod resonator method / Y. Kobayashi, M. Katoh // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – 1985. – Vol. 33, № 7. – P. 586–592. – DOI: 10.1109/TMTT.1985.1133033.

141. Sheen, J. Amendment of Cavity Perturbation Technique for Loss Tangent Measurement at Microwave Frequencies / J. Sheen // *7th International Symposium on Antennas, Propagation & EM Theory, Guilin, China*. – 2006. – P. 1–3. – DOI: 10.1109/ISAPE.2006.353221.

142. Емельянов, Е. В. Диэлектрическая проницаемость композиционных материалов на основе многостенных углеродных нанотрубок, измеренная методом

открытого квазиоптического резонатора / Е. В. Емельянов, Г. А. Дорофеева // Доклады ТУСУРа. – 2010. – № 2-2 (22). – С. 38–40.

143. Nicolson, A. M. Measurement of the intrinsic properties of materials by time domain techniques / A. M. Nicolson, G. F. Ross // IEEE Trans. Instrum. Meas. – 1970. – № 4. – P. 377–382. – DOI: 10.1109/TIM.1970.4313932.

144. Кулешов, Г. Е. Электромагнитные характеристики композитов на основе углеродных наноструктур и гексаферритов в гигагерцовом диапазоне / Г. Е. Кулешов, О. А. Доценко, О. А. Кочеткова, В. И. Суслев // Известия вузов. Физика. – 2013. – Т. 56, № 8-1. – С. 315–317.

145. Li, Z. A new microwave cavity resonator sensor for measuring coating thickness on carbon fibre composites / Z. Li, Z. Meng, C. Wu [et al.] // NDT & E International. – 2022. – Vol. 126. – P. 102584. – DOI: 10.1016/j.ndteint.2021.102584.

146. Никитенко, К. В. Измерение диэлектрической проницаемости композитных материалов на СВЧ / К. В. Никитенко, Т. А. Пулко, Н. В. Колбун // Доклады БГУИР. – 2008. – № 8 (38). – С. 64–67.

147. Усанов, Д. А. Использование сверхвысокочастотной коаксиальной брэгговской структуры для измерения параметров диэлектриков / Д. А. Усанов, С. А. Никитов, А. В. Скрипаль [и др.] // Радиотехника и электроника. – 2020. – Т. 65, № 5. – С. 495–503. – DOI: 10.31857/S0033849420040099.

148. Способ определения относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь диэлектрической структуры : патент 2716600 Российская Федерация : МПК G01R 27/26 / Д. А. Усанов, С. А. Никитов, А. В. Скрипаль [и др.] ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского». – № 2019119672 ; заявл. 25.06.2019 ; опубл. 13.03.2020, Бюл. № 8.

149. Queffelec, P. A microstrip device for the broad band simultaneous measurement of complex permeability and permittivity / P. Queffelec, P. Gelin, J. Gieraltowski, J. Loaec // IEEE Transactions on Magnetics. – 1994. – Vol. 30, № 2. – DOI: 10.1109/20.312214.

150. Усанов, Д. А. Измерение параметров твердых и жидких диэлектриков на сверхвысоких частотах с использованием микрополосковых фотонных структур / Д. А. Усанов, С. А. Никитов, А. В. Скрипаль [и др.] // Радиотехника и электроника. – 2012. – Т. 57, № 2. – С. 230–236.

151. Усанов, Д. А. Фотонные структуры в СВЧ-диапазоне и их применение для измерения параметров композитов с включениями из углеродных нанотрубок и жидких диэлектриков / Д. А. Усанов, А. В. Скрипаль, А. В. Abramov [и др.] // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2010. – Т. 13, № 3. – С. 26–34.

152. Молчанов, С. Ю. Измерение диэлектрической проницаемости композитных наноматериалов с использованием микрополоскового встречно-штыревого резонатора в сантиметровом диапазоне радиоволн / С. Ю. Молчанов, Н. М. Ушаков, А. Н. Литвиненко // Успехи прикладной физики. – 2019. – Т. 7, № 5. – С. 519–524.

153. Скрипаль, А. В. Амплитудно-частотные характеристики СВЧ фотонных кристаллов, содержащих слои неоднородного ферромагнитного эластомера / А. В. Скрипаль, Д. В. Пономарев, А. А. Александров // VII научный форум телекоммуникации: теория и технологии ТТТ-2024. «Физика и технические приложения волновых процессов» ФиТПВП-2024 : материалы XXI Международной научно-технической конференции. – Самара : ПГУТИ, 2024. – С. 141–142.

154. Способ измерения параметров полупроводниковых структур : патент 2622600 Российская Федерация : МПК G01R 31/26 / Д. А. Усанов, А. В. Скрипаль, Д. В. Пономарев, Е. В. Латышева ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского». – № 2015150309 ; заявл. 25.11.2015 ; опубл. 16.06.2017, Бюл. № 17.

155. Скрипаль, А. В. Использование дефектных мод фотонных кристаллов для измерения параметров поглотителей / А. В. Скрипаль, В. С. Тяжлов, Д. В. Пономарев, В. Е. Шаронов // Электроника и микроэлектроника СВЧ : сборник

докладов XII Всероссийской научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 2023. – Санкт-Петербург : СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. – С. 335–339.

156. Скрипаль, А. В. Резо resonances в фотонных кристаллах сверхвысокочастотного диапазона при использовании в качестве интерфейса структуры, содержащей воду в виде сплошного слоя / А. В. Скрипаль, Д. В. Пономарев, М. А. Волшаник // Письма в ЖТФ. – 2024. – Т. 50, вып. 15. – С. 30–33. – DOI: 10.61011/PJTF.2024.15.58437.19880.

157. Ivanov, A. O. Ferrofluid aggregation in chains under the influence of a magnetic field / A. O. Ivanov, S. S. Kantorovich, V. S. Mendeleev, E. S. Pyanzina // J. Magn. Magn. Mater. – 2006. – Vol. 300. – P. 206–209. – DOI: 10.1016/j.jmmm.2005.10.081.

158. Li, J. Magnetically Responsive Optical Modulation: from Anisotropic Nanostructures to Emerging Applications / J. Li, G. Li, X. Lu [et al.] // Adv. Funct. Mater. – 2023. – Vol. 33, № 41. – P. 2308293. – DOI: 10.1002/adfm.202308293.

159. Усанов, Д. А. СВЧ фотонные кристаллы. Новые сферы применения / Д. А. Усанов, М. К. Мерданов, А. В. Скрипаль, Д. В. Пономарев // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. – 2015. – Т. 15, № 1. – С. 57.

160. Усанов, Д. А. Температурная зависимость коэффициента отражения микроволнового излучения от слоя магнитной жидкости / Д. А. Усанов, Ал. В. Скрипаль, Ан. В. Скрипаль [и др.] // ЖТФ. – 2006. – Т. 76, № 11. – С. 126.

161. Mohammed, S. R. A review on microwave non-destructive testing (NDT) of composites / S. R. Mohammed, Mohamed A. Abou-Khousa, Muhammad F. A. // Engineering Science and Technology, an International Journal. – 2024. – Vol. 58. – P. 101848. – DOI: 10.1016/j.jestch.2024.101848.

162. Казьмин, А. И. Контроль диэлектрической проницаемости и толщины анизотропных диэлектрических покрытий методом поверхностных электромагнитных волн / А. И. Казьмин, П. А. Федюнин, Д. П. Федюнин // Дефектоскопия. – 2021. – № 6. – С. 57–72.

163. Vegesna, S. Non-destructive technique for broadband characterization of carbon nanotubes at microwave frequencies / S. Vegesna, F. Irin, M. Green, M. Sae //

Journal of Electromagnetic Waves and Applications. – 2013. – Vol. 27, № 11. – P. 1372–1381. – DOI: 10.1080/09205071.2013.808968.

164. Бочкова, Т. С. Определение параметров магнитной жидкости по температурной зависимости спектра отражения сверхвысокочастотного излучения с учетом образованных агломератов ферромагнитных наночастиц / Т. С. Бочкова, С. В. Игонин, Д. А. Усанов, А. Э. Постельга // Дефектоскопия. – 2018. – № 8. – С. 41–49. – DOI: 10.1134/S0130308218080055.

165. Усанов, Д. А. Многопараметровые измерения структур сверхвысокочастотными волноводными методами / Д. А. Усанов, А. Э. Постельга, Т. С. Бочкова, К. А. Гуров, С. В. Игонин // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2018. – Т. 21, № 3. – С. 12–17.

166. Способ определения параметров магнитной жидкости : патент 2679457 Российская Федерация : МПК G01N 27/00 / Д. А. Усанов, А. Э. Постельга, Т. С. Бочкова, С. В. Игонин ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского». – № 2017140519 ; заявл. 22.11.2017 ; опубл. 11.02.2019, Бюл. № 5.

167. Сушко, М. Я. Метод компактных групп в теории диэлектрической проницаемости гетерогенных систем / М. Я. Сушко, С. К. Криськив // ЖТФ. – 2009. – Т. 79, № 3. – С. 97–101.

168. Тихонов, Ю. С. Исследование планарных фрактальных антенн "Ковер Серпинского" выполненных по SIW технологии / Ю. С. Тихонов, В. А. Иванов, А. Д. Исаев [и др.] // Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2023. – Т. 1. – С. 454–458.

169. Никольский, В. В. Гиротропное возмущение волновода / В. В. Никольский // Радиотехника и электроника. – 1957. – Т. 2, № 2. – С. 157–171.

170. Чэмплин, К. С. Выражения в явном виде для проводимости и диэлектрической проницаемости объемных полупроводников в волноводе / К. С. Чэмплин, Д. Б. Армстронг // ТИРИ. – 1962. – Т. 50, № 2. – С. 272–273.

171. Sihvola, A. H. Effective permittivity of dielectric mixtures / A. H. Sihvola, J. A. Kong // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 1988. – Vol. 26, № 4. – P. 420–429. – DOI: 10.1109/36.3045.

172. Егоров, Ю. В. Частично заполненные прямоугольные волноводы / Ю. В. Егоров. – Москва : Советское радио, 1967. – 217 с.