

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

© 2025 г. А.Э. Постельга^{1,*}, С.В. Игонин^{1,**}

¹ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского», Россия 410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
E-mail: *sanyalace@inbox.ru; **igoninsemen@ya.ru

Поступила в редакцию 29.11.2024; после доработки 30.01.2025
Принята к публикации 31.05.2025

Исследованы электрофизические свойства материала, представляющего собой композит из эпоксидной смолы, магнитной жидкости и углеродных нанотрубок. Показано, что в композитах, высушенных в присутствии магнитного поля, образуются вытянутые проводящие структуры, состоящие из углеродных нанотрубок и магнитной жидкости. Их наличием обусловлено появление анизотропии электрофизических свойств такого рода композитов. Анизотропия свойств исследовалась СВЧ-волноводными методами, по частотной зависимости коэффициента отражения СВЧ-излучения от периодической структуры, в которой в качестве нарушенного слоя использовался исследуемый композит. Было выявлено, что электрофизические свойства композита зависят от величины и направления индукции магнитного поля, а также от изменения концентрации составных частей в композите. Произведено численное моделирование и показана важность учета анизотропии электрофизических свойств образованных структур при расчете интегральных параметров композита.

Ключевые слова: магнитная жидкость, углеродные нанотрубки, СВЧ, фотонный кристалл, композит, структурообразование, моделирование, анизотропия.

THE ANISOTROPY DEGREE MEASUREMENT OF ELECTRICAL PROPERTIES OF THE EPOXY RESIN — MAGNETIC FLUID — CARBON NANOTUBES COMPOSITE

© 2025 A.E. Postelga^{1,*}, S.V. Igonin^{1,**}

¹FSBEI HE "Saratov National Research State University named after N.G. Chernyshevsky", Russia 410012
Saratov, Astrakhanskaya str., 83
E-mail: *sanyalace@inbox.ru; **igoninsemen@ya.ru

The electrical properties of a material representing a composite of epoxy resin, magnetic fluid and carbon nanotubes are investigated. It is shown that in composites dried in the presence of a magnetic field, elongated conductive structures consisting of carbon nanotubes and magnetic fluid are formed. Their presence causes the appearance of anisotropy of the electrical properties of such composites. The anisotropy of the properties was studied by microwave waveguide methods, according to the frequency dependence of the reflection coefficient of microwave radiation from a periodic structure in which the composite under study was used as a damaged layer. It was found that the electrical properties of the composite depend on the magnitude and direction of the magnetic field induction, as well as on changes in the concentration of components in the composite. Numerical modeling was performed and the importance of taking into account the anisotropy of the electrical properties of the formed structures when calculating the integral parameters of the composite was shown.

Keywords: magnetic fluid, carbon nanotubes, microwave, photonic crystal, composite, structure formation, modeling, anisotropy.

DOI: 10.31857/S0130308225020053

ВВЕДЕНИЕ

Среди множества методов неразрушающего контроля широко используются электромагнитные методы [1], использующие явления магнетизма и электричества для обнаружения и оценки трещин, дефектов, коррозии или других состояний материалов. Внутри тестируемого объекта индуцируются электрические токи, магнитные поля или и то, и другое, и наблюдается электромагнитный отклик. Разновидностью электромагнитных методов являются СВЧ-методы [2], которые используют для контроля электрофизических параметров анизотропных диэлектрических покрытий в том числе [3], а также наноразмерных объектов, таких как нанотрубки [4] и магнитные агломераты наночастиц в коллоидных средах [5].

Углеродные нанотрубки (УНТ) обладают уникальными физическими свойствами: прочностью, высокой электропроводностью, устойчивостью к высоким температурам, химической

инертностью. Этим обусловлен интерес использования УНТ в материаловедении, биомедицине и электронике [6].

Эпоксидная смола хорошо зарекомендовала себя как материал, демонстрирующий ряд интересных характеристик, которые можно регулировать в широких пределах добавлением нановключений [7]. Она широко используется в приложениях от микроэлектроники до аэрокосмической промышленности.

Использование углеродных нанотрубок в композитах позволяет получать материалы с особыми механическими и электрофизическими свойствами [8].

Добавление УНТ в эпоксидную смолу приводит к увеличению проводимости композита. Проводимость данных композитов на СВЧ исследовалась в [9—11]. Выравнивание УНТ посредством приложения электрического поля приводит к увеличению электропроводности и улучшению механических свойств (увеличению модуля упругости), измеренных в направлении ориентации УНТ по сравнению с композитами, содержащими случайно ориентированные УНТ [12, 13]. Анизотропия проводимости магнитных композитов с УНТ исследовалась в [14].

Выравнивание УНТ в матрице композита может производиться посредством приложения электрического или магнитного поля. Интересным является эффект выстраивания УНТ в вытянутые структуры в магнитных жидкостях (МЖ) при приложении магнитного поля, который проявляется в изменении магнитореологических, теплопроводящих [15] и оптических [16] свойств. Что касается электрофизических свойств, действительная и мнимая части комплексной диэлектрической проницаемости композита в направлении поля увеличиваются, а перпендикулярно ему — уменьшаются [17]. Изучение особенностей отражения в СВЧ диапазоне от магнитных эмульсий при приложении магнитного поля исследуется в [18], основной вклад в отражение вносит ферромагнитный резонанс.

В настоящей работе исследуется композит эпоксидная смола — магнитная жидкость — углеродные нанотрубки (ЭС—МЖ—УНТ), высушенный при различных значениях и направлениях индукции магнитного поля, при различных массовых долях УНТ 0,01—0,35 вес. %. Произведен учет анизотропии электропроводности УНТ при моделировании структуры композита. Измерения электрических свойств проводилось СВЧ-волноводными методами.

Простейшим и до сих пор актуальным СВЧ-методом контроля параметров поверхности является микроволновая рефлектометрия с использованием СВЧ-зонда [19]. Увеличение чувствительности СВЧ-методов измерений достигается созданием резонансной системы, амплитудно-частотные характеристики которой сильно зависят от свойств исследуемого образца. В качестве такой системы можно использовать периодические структуры, называемые СВЧ-фотонными кристаллами. Размещение внутри такой структуры в качестве нарушения периодичности исследуемого образца приводит к возникновению в запрещенной зоне дефектной моды [20]. Такого рода способ был применен в настоящей работе. Интересным, с точки зрения практического применения, является возможность расположения образца в примыкающем слое [21], что открывает перспективу использования СВЧ-фотонных кристаллов в неразрушающем контроле параметров материалов.

1. ИССЛЕДУЕМЫЕ ОБРАЗЦЫ

Композит ЭС—МЖ—УНТ изготавливался из двух компонент:

- компонент А — суспензия магнитной жидкости с углеродными нанотрубками (МЖ—УНТ);
- компонент В — эпоксидная смола с отвердителем (ЭС).

Компонент А изготавливался следующим образом. Магнитная жидкость (на основе керосина, диаметр ферромагнитных частиц 10 нм, объемная доля твердой фазы 0,14, стабилизирована олеиновой кислотой) массой m_{ff} перемешивалась с навеской УНТ m_{cnt} на магнитной мешалке, полученная суспензия подвергалась воздействию ультразвука с целью уменьшить агрегацию УНТ. Далее, определенная масса компонента А (суспензии МЖ—УНТ) m_{A} механически перемешивалась с компонентом В массой m_{B} (эпоксидная смола и отвердитель). Полученный ЭС—МЖ—УНТ композит заливался в две силиконовые формы. Одна из форм располагалась между постоянными магнитами, а другая — в отсутствие магнитного поля. После застывания торец композита стачивался для получения необходимой длины. В результате были изготовлены образцы композита ЭС—МЖ—УНТ в форме параллелепипеда размером $23 \times 10 \times 4$ мм. В объеме эпоксидной смолы образуются вытянутые структуры (рис. 1) в направлении магнитного поля, при котором происходило изготовление. Средняя толщина структур составила 150 мкм.

Было изготовлено четыре набора образцов (табл. 1). В табл. 1 полужирным выделен параметр, который изменялся в данном наборе, $c_{m, \text{A}}$ — массовая доля компонента А, а $c_{m, \text{cnt}}$ — соответствующая ей массовая доля УНТ в композите ЭС—МЖ—УНТ. Во всех наборах, кроме

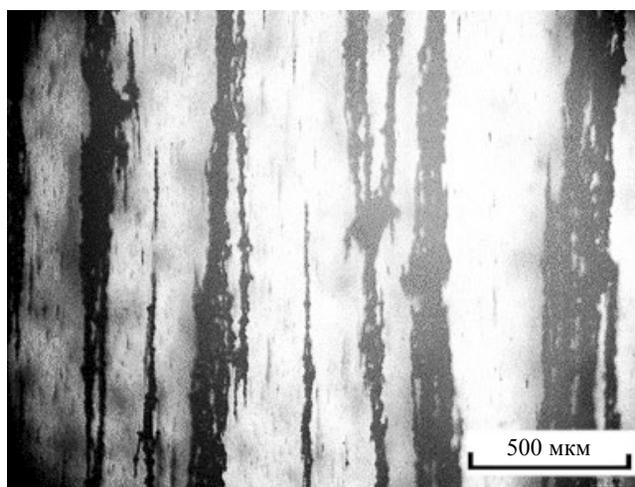


Рис. 1. Фото с оптического микроскопа вытянутых структур, образующихся в эпоксидной смоле, при приложении магнитного поля. Структуры состоят из магнитных частиц и УНТ (образец из Set A).

Таблица 1

Параметры композитов для каждого набора образцов

Набор	B , направление	B , мТл	c_{m_A} , %	$c_{m_{cnt}}$, %	m_{cnt}/m_{ff}
Set A	, //, \perp	130	2,7	0,053	0,02
Set B		20...1200	2,7	0,053	0,02
Set C		130	1,0...18,0	0,01...0,345	0,02
Set D		130	2,7	0,053	0,005...0,1

Set A, магнитное поле при изготовлении образцов ориентировалось в направлении, при котором образующиеся в композите вытянутые структуры располагались параллельно электрической компоненте СВЧ-волны (параллельно узкой стенке волновода).

Образцы в каждом наборе изготавливались с целью изучить влияние на электрофизические параметры композита:

Set A — ориентации вектора индукции магнитного поля, при котором происходило изготовление образцов;

Set B — величины индукции магнитного поля, при котором происходило изготовление образцов;

Set C — массовой доли компонента А (суспензии МЖ—УНТ) в образцах;

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

2. ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 2а. Падающая СВЧ-волна с векторного анализатора 1 направлялась по коаксиалу 2 через коаксиально-волноводный преобразователь 3 в волновод 4 с сечением 23×10 мм, в котором размещалась исследуемая структура 5. Прошедшая через структуру СВЧ-мощность поглощалась согласованной нагрузкой 6, а отраженная волна через коаксиально-волноводный переход 3 по коаксиалу 2 возвращалась в векторный анализатор 1. Измерения производились с использованием векторного анализатора цепей Agilent Tech. 5242A PNA-X Network Analyzer в диапазоне частот 9—10 ГГц.

Исследовались частотные зависимости коэффициента отражения от фотонного кристалла (рис. 2б), представляющего собой чередующиеся слои поликора толщиной 1,0 мм и фторопласта толщиной 9,8 мм (всего 11 слоев). В 6-м слое вместо фторопласта размещался исследуемый образец, который являлся нарушением периодичности фотонного кристалла.

При расчете параметров необходимо знать эффективную плотность УНТ, которую можно определить из формулы для объемной доли:

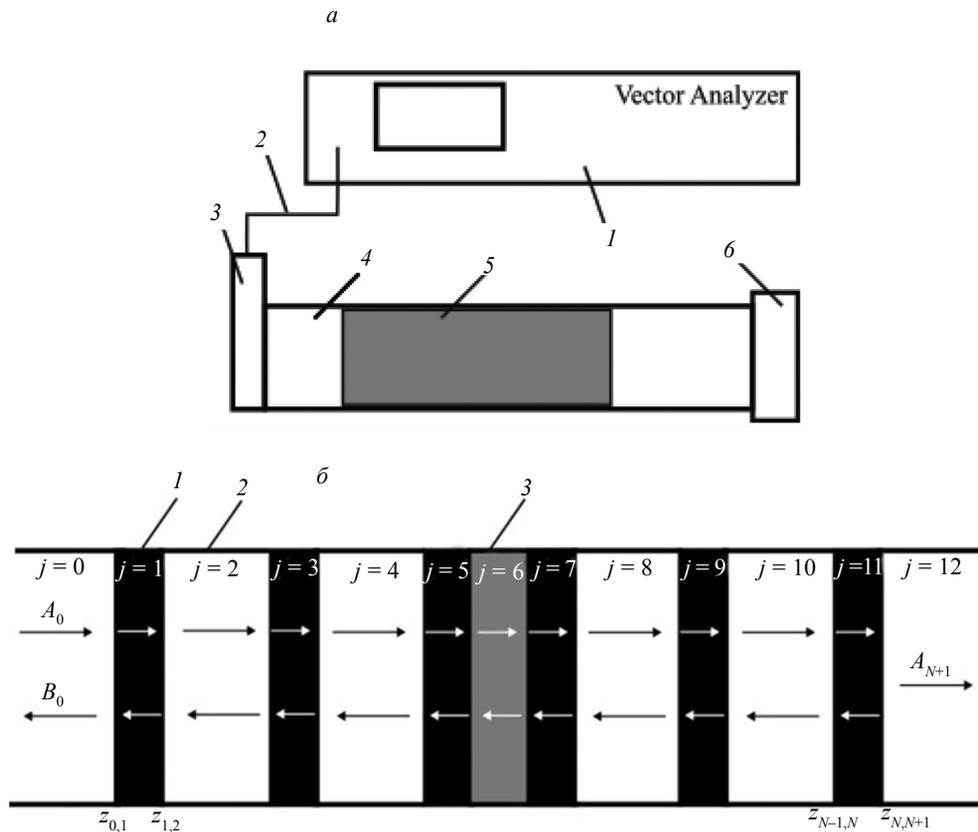


Рис. 2. Схематичное изображение экспериментальной установки и исследуемой структуры. Экспериментальная установка (а): 1 — векторный анализатор цепей; 2 — коаксиал; 3 — коаксиально-волноводный преобразователь; 4 — прямоугольный волновод; 5 — исследуемая структура; б — согласованная нагрузка. Исследуемая структура (б): 1 — слои поликора толщиной 1,0 мм; 2 — слои фторопласта толщиной 9,8 мм; 3 — исследуемый образец толщиной 4,0 мм; j — номер слоя; $z_{j,j+1}$ — расстояние от поверхности структуры до границы между слоями с номером j и $j+1$, A_j и B_j — амплитуды падающих и отраженных электромагнитных волн в слое с номером j .

$$v_{\text{cnt}} = \frac{V_{\text{cnt}}}{V_{\text{эпокс}} + V_{\text{cnt}}} = \frac{m_{\text{cnt}} / \rho_{\text{cnt}}}{m_{\text{эпокс}} / \rho_{\text{эпокс}} + m_{\text{cnt}} / \rho_{\text{cnt}}}, \quad (1)$$

где V_{cnt} — объем УНТ в композите; $V_{\text{эпокс}}$ — объем эпоксидной смолы с отвердителем. Из (1) получим:

$$\rho_{\text{cnt}} = \frac{m_{\text{cnt}} \rho_{\text{эпокс}}}{m_{\text{эпокс}}} \frac{1 - v_{\text{cnt}}}{v_{\text{cnt}}}, \quad (2)$$

Объемную долю УНТ v_{cnt} было предложено определять по анализу фотографий образца из эпоксидной смолы с УНТ (рис. 3а), толщиной 850 мкм. С использованием программы ImageJ была произведена бинаризация (рис. 3б) и определена площадь порядка 5700 частиц, представляющих собой включения из УНТ неправильной формы. Для определения общего объема частиц их форма приближенно считалась сферической: из площади определялся эффективный радиус частицы, а по радиусу — объем частицы $V_{\text{cnt}i}$. Общий объем, занимаемый УНТ, равен сумме объемов всех частиц $V_{\text{cnt}} = \sum_i V_{\text{cnt}i}$.

Зная объем образца и объем УНТ в нем, по формуле (1) была рассчитана объемная доля УНТ:

$$v_{\text{cnt}} = 0,013.$$

Подставляя экспериментальные значения $m_{\text{cnt}} = 0,01$ г, $m_{\text{эпокс}} = 9,00$ г, $\rho_{\text{эпокс}} = 1180$ кг/м³, $v_{\text{cnt}} = 0,013$ в формулу (2), получим величину для эффективной плотности включений из УНТ $\rho_{\text{cnt,эфф}} = 98,64$. Данное значение несколько больше, чем насыпная плотность 25—60 кг/м³ для УНТ серии «Таунит-М» из справочных данных. Увеличение значения эффективной плотности

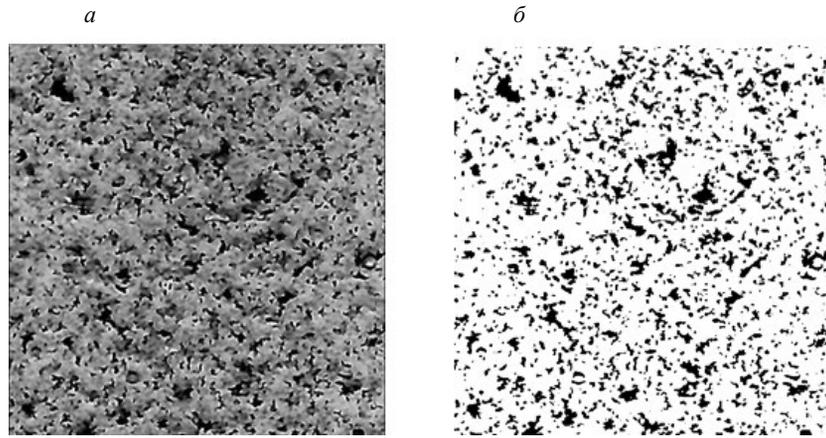


Рис. 3. Фрагмент отсканированного изображения образца (а) и результат бинаризации (б).

УНТ связано с влиянием матрицы (эпоксидной смолы), которая, вероятно, способствует объединению отдельных нанотрубок в более плотные агрегаты.

Измерив массу УНТ, зная их эффективную плотность $\rho_{\text{cnt, eff}}$ становится возможным определение объемной доли включений из УНТ $v_{\text{cnt, in, comp}}$ в составе многокомпонентного композита ЭС—МЖ—УНТ.

3. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ

3.1. Набор образцов Set A

Нарушение периодичности структуры фотонного кристалла приводит к появлению на частотной зависимости характерного резкого минимума коэффициента отражения (рис. 4). Положение минимума по частоте и величине определяется параметрами исследуемого образца. Размещение в качестве нарушения периодичности образца, высушенного в магнитном поле, направленном параллельно электрической компоненте СВЧ-волны в волноводе, приводит к уменьшению коэффициента отражения и смещению минимума влево (рис. 4, кривая 2) относительно образца, высушенного без магнитного поля (рис. 4, кривая 1). Это свидетельствует об увеличении проводимости и диэлектрической проницаемости образца, которое обусловлено возникновением вытянутых структур из УНТ и магнитных частиц в направлении магнитного поля. При увеличении угла между магнитным полем и электрической компонентой СВЧ-волны коэффициент отражения уменьшается (рис. 4, кривая 3), а при перпендикулярной ориентации становится даже меньше, чем для образца, высушенного без магнитного поля (рис. 4, кривая 4).

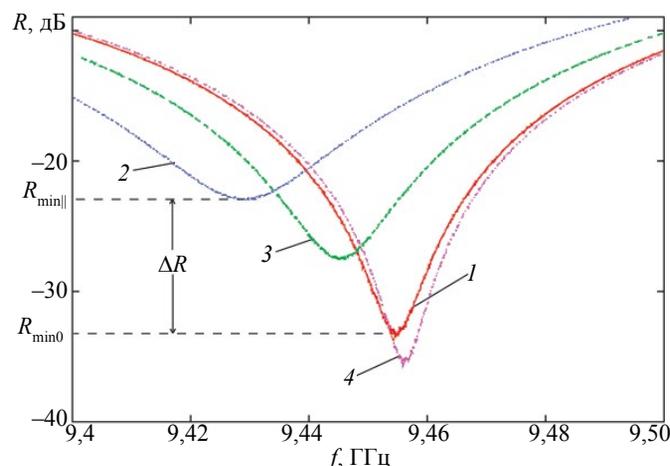


Рис. 4. Частотные зависимости коэффициента отражения от периодической структуры, в качестве нарушения используются образцы (Set A), высушенные при магнитном поле, ориентированном: 1 — без магнитного поля; 2 — параллельно; 3 — под углом 45°; 4 — перпендикулярно электрической компоненте СВЧ-волны (широкой стенке волновода); $\Delta R = R_{\text{min} \parallel} - R_0$ — разность минимумов коэффициента отражения при размещении в структуре образца, высушенного в магнитном поле, параллельном узкой стенке волновода, и без магнитного поля.

Ориентация вытянутых структур параллельно узкой стенке волновода приводит к максимальному взаимодействию с ними электрической компоненты СВЧ-волны. Поэтому дальнейшие наборы образцов изготавливались при данной ориентации магнитного поля. Численные расчеты и моделирование, объясняющие зависимости, представленные на рис. 4, будут произведены в следующем разделе.

Также было исследовано влияние ориентации магнитного поля на свойства композита ЭС—МЖ (без УНТ) и композита эпоксидная смола — магнитная жидкость — графит (ЭС—МЖ—Гр) при тех же объемных долях магнитной жидкости и графита, что и в композите ЭС—МЖ—УНТ. Наибольшая анизотропия минимума коэффициента отражения (рис. 5) наблюдается для композита ЭС—МЖ—УНТ. Параметры композита ЭС—МЖ—УНТ определяются не только наличием вытянутых проводящих структур, но и анизотропией свойств самих УНТ, ориентированных вдоль направления магнитного поля.

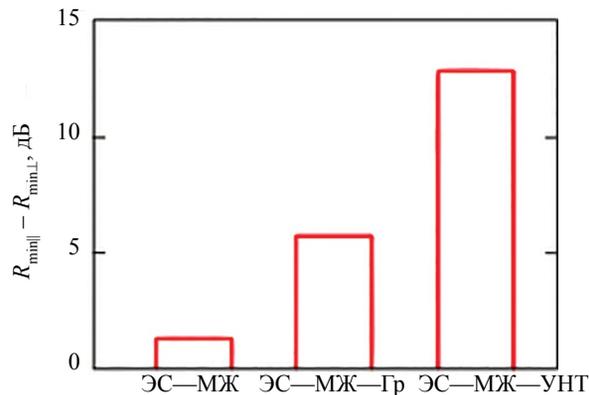


Рис. 5. Разность между минимальными значениями коэффициента отражения от периодической структуры, в качестве нарушения используются образцы, изготовленные из композитов различного состава, высушенные при ортогональных направлениях индукции магнитного поля.

Ориентация структур в композитах ЭС—МЖ (без УНТ или графита) слабо влияет на коэффициент отражения от фотонного кристалла (см. рис. 5). Поэтому при дальнейшем анализе пренебрегаем вкладом от магнитных частиц.

Для характеристики анизотропии свойств композита введем параметр $\Delta R = R_{\min||} - R_{\min0}$, где $R_{\min||}$ — минимум коэффициента отражения от фотонного кристалла, в котором в качестве нарушения используется образец, высушенный при приложении магнитного поля с индукцией, направленной параллельно электрической компоненте СВЧ-волны, $R_{\min0}$ — образец, высушенный без магнитного поля.

3.2. Набор образцов Set B

Резкое возрастание величины минимума коэффициента отражения с увеличением индукции магнитного поля (рис. 6) связано с образованием вытянутых структур при малых магнит-

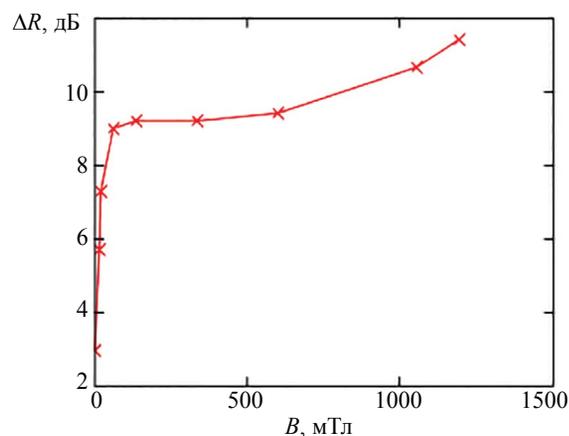


Рис. 6. Зависимость параметра ΔR от величины индукции магнитного поля, при котором производилось изготовление образцов (Set B).

ных полях, начиная с 5 мТл. Процесс структурообразования в композите выходит на насыщение при значении магнитной индукции 100—500 мТл, получаются образцы с одинаковыми параметрами. При сильных полях, более 600 мТл, суспензия МЖ—УНТ стягивается ближе к центру образца, где электрическое поле СВЧ-волны максимально, соответственно усиливается взаимодействие электромагнитной волны со структурами из УНТ и увеличивается коэффициент отражения.

Остальные наборы образцов изготавливались при значении магнитного поля 130 мТл, при котором процесс структурообразования выходит на насыщение.

3.3. Набор образцов Set C

Увеличение концентрации компонента А c_{m_A} (концентрация УНТ в компоненте А оставалась постоянной и составляла 2,0 вес. %) в композите ЭС—МЖ—УНТ приводит к возрастанию проводимости образцов и, как следствие, увеличению коэффициента отражения, в том числе для образцов, высушенных без магнитного поля (рис. 7а, кривая 1).

При больших концентрациях компонента А (более 12 вес. %) происходит снижение интенсивности процесса структурообразования, о чем свидетельствует спад коэффициента отражения (рис. 7а, кривая 2), что может быть объяснено изменением реологических свойств смеси в процессе изготовления композита.

На рис. 7б представлена зависимость разности минимумов коэффициента отражения ΔR при размещении в фотонном кристалле образцов, высушенных в магнитном поле (кривая 2) и без магнитного поля (кривая 1), от массовой доли компонента А в композите ЭС—МЖ—УНТ. Большие концентрации компонента А приводят к снижению анизотропии свойств композита.

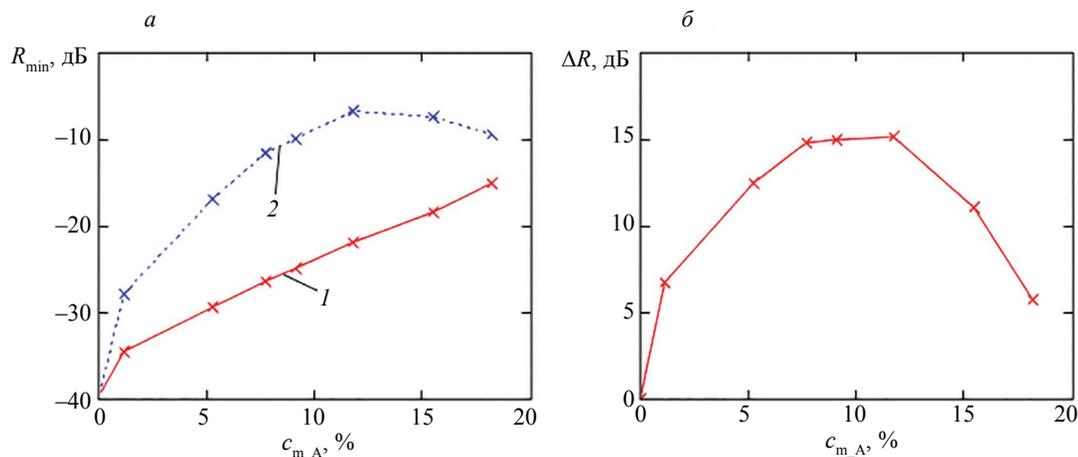


Рис. 7. Зависимость от массовой доли компонента А (Set C) минимума коэффициента отражения (а): 1 — образцы, высушены без магнитного поля, 2 — при приложении магнитного поля с индукцией 130 мТл; разности значений кривой 2 и кривой 1 (б).

3.4. Набор образцов Set D

Увеличение концентрации УНТ в компоненте А (суспензии МЖ—УНТ) приводит к возрастанию проводимости образцов и минимума коэффициента отражения для образцов, высушенных без магнитного поля (рис. 8а, кривая 1) и в присутствии магнитного поля с индукцией 130 мТл (рис. 8а, кривая 2).

При больших концентрациях часть УНТ не принимает участие в процессе структурообразования, и кривая 2 на рис. 8а выходит на насыщение. При этом неструктурированные УНТ увеличивают проводимость образцов, высушенных без магнитного поля, что приводит к спаду на зависимости ΔR (рис. 8б).

Большие концентрации УНТ в компоненте А приводят к снижению анизотропии свойств композита. Остальные образцы изготавливались при массовой доле УНТ в компоненте А, равной 2,0 вес. %, при данных концентрациях большинство УНТ принимают участие в процессе структурообразования.

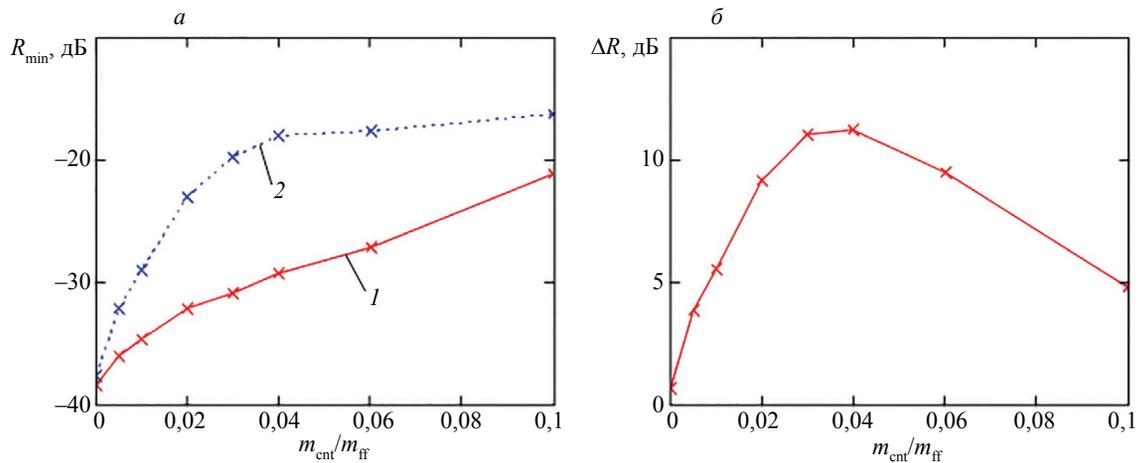


Рис. 8. Исследование коэффициента отражения от периодической структуры при использовании в качестве нарушения образцов из Set D: минимум коэффициента отражения от отношения массы УНТ к массе МЖ в компоненте А (при массовой доле компонента А в композите ЭС—МЖ—УНТ $c_{m,A} = 2,7\%$) (а): кривая 1 — образцы, высушенные без магнитного поля, 2 — при приложении магнитного поля с индукцией 130 мТл; разность значений кривой 2 и кривой 1 (б).

4. РАСЧЕТЫ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

Распространение волны в волноводе через периодическую структуру описывается методом матрицы передачи [22]. Можно записать следующее выражение для компонент матрицы передачи:

$$\mathbf{T}(z_{j,j+1}) = \begin{pmatrix} \frac{\gamma_{j+1} + \gamma_j}{2\gamma_{j+1}} e^{(\gamma_{j+1} - \gamma_j)z_{j,j+1}} & \frac{\gamma_{j+1} - \gamma_j}{2\gamma_{j+1}} e^{(\gamma_{j+1} + \gamma_j)z_{j,j+1}} \\ \frac{\gamma_{j+1} - \gamma_j}{2\gamma_{j+1}} e^{-(\gamma_{j+1} + \gamma_j)z_{j,j+1}} & \frac{\gamma_{j+1} + \gamma_j}{2\gamma_{j+1}} e^{-(\gamma_{j+1} - \gamma_j)z_{j,j+1}} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

которая связывает коэффициенты A_j , B_j и A_{j+1} , B_{j+1} , определяющие амплитуды падающих и отраженных волн по обе стороны от границы $z_{j,j+1}$, соотношением:

$$\begin{pmatrix} A_{j+1} \\ B_{j+1} \end{pmatrix} = \mathbf{T}(z_{j,j+1}) \begin{pmatrix} A_j \\ B_j \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где

$$\gamma_0^2 = \frac{\pi^2}{a^2} - \omega^2 \epsilon_0 \mu_0, \quad \gamma_j^2 = \frac{\pi^2}{a^2} - \omega^2 \epsilon_0 \mu_0 \epsilon_j \mu_j, \quad (5)$$

где γ_0 и γ_j — постоянные распространения электромагнитной волны в вакууме и в слое с номером j ; a — размер широкой стенки волновода; ω — частота электромагнитного излучения; ϵ_0 и μ_0 — электрическая и магнитная постоянные; ϵ_j и μ_j — диэлектрическая и магнитная проницаемости слоя с номером j ; A_j , B_j — коэффициенты, определяющие амплитуды падающей и отраженной волны от слоя с номером j ; z — расстояние от поверхности структуры, отсчитываемое вдоль направления распространения электромагнитной волны. Для фотонного кристалла, состоящего из 11 слоев, индекс j принимает целые значения от 0 до 12. Слои $j = 0$ и $j = 12$ соответствуют воздуху перед и после периодической структуры (см. рис. 2).

Коэффициенты A_{N+1} и B_0 , определяющие амплитуды волны, прошедшей через многослойную структуру (см. рис. 2), и волны, отраженной от нее, связаны с коэффициентом A_0 , определяющим амплитуду падающей волны, следующим соотношением:

$$\begin{pmatrix} A_{N+1} \\ 0 \end{pmatrix} = \mathbf{T}_N \begin{pmatrix} A_0 \\ B_0 \end{pmatrix}, \quad (6)$$

где

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

дачи периодической структуры, состоящей из $N = 11$ слоев.

Записывая коэффициент отражения $R = B_0/A_0$ через элементы матрицы передачи \mathbf{T}_N , в соответствии с соотношением (4), получим:

$$R = -\frac{\mathbf{T}_N [2, 1]}{\mathbf{T}_N [2, 2]}. \quad (7)$$

Положение минимума коэффициента отражения на частотной зависимости определяется комплексной диэлектрической проницаемостью образца $\epsilon' - i\epsilon''$. Причем частота минимума определяется действительной частью ϵ' , а величина минимума — мнимой частью ϵ'' , характеризующей потери в композите.

Диэлектрическая проницаемость магнитной жидкости близка по значению к диэлектрической проницаемости эпоксидной смолы и слабо влияет на значение диэлектрической проницаемости композита по сравнению с УНТ. Пренебрежем влиянием магнитных частиц, будем считать, что параметры композита определяются только углеродными нанотрубками.

Измерив диэлектрическую проницаемость композита $\epsilon_{\text{comp}0}$, высушенного без магнитного поля, можно определить диэлектрическую проницаемость включений из неориентированных УНТ, используя модель эффективной среды Максвелла—Гарнетта, описываемую формулой [23]:

$$\epsilon_{\text{comp}0} = \frac{1 + 2v_{\text{cnt_in_comp}} \frac{\epsilon_{\text{cnt}} - \epsilon_B}{2\epsilon_B + \epsilon_{\text{cnt}}}}{1 - v_{\text{cnt_in_comp}} \frac{\epsilon_{\text{cnt}} - \epsilon_B}{2\epsilon_B + \epsilon_{\text{cnt}}}}, \quad (8)$$

где ϵ_B и ϵ_{cnt} — диэлектрическая проницаемость матрицы (компонент В — эпоксидная смола) и включений из УНТ; $v_{\text{cnt_in_comp}}$ — объемная доля УНТ в образце, определяемая формулой:

$$v_{\text{cnt_in_comp}} = v_{\text{cnt_in_A}} \cdot v_{\text{A_in_comp}}, \quad (9)$$

где $v_{\text{cnt_in_A}}$ — объемная доля УНТ в компоненте А; $v_{\text{A_in_comp}}$ — объемная доля компонента А в итоговом композите ЭС—МЖ—УНТ:

$$v_{\text{cnt_in_A}} = \frac{m_{\text{cnt}} / \rho_{\text{cnt}}}{m_{\text{ff}} / \rho_{\text{ff}} + m_{\text{cnt}} / \rho_{\text{cnt}}} = \frac{m_{\text{cnt}} \rho_{\text{ff}}}{m_{\text{ff}} \rho_{\text{cnt}} + m_{\text{cnt}} \rho_{\text{ff}}}; \quad (10)$$

$$v_{\text{A_in_comp}} = \frac{m_A \rho_B}{m_A \rho_B + m_B \rho_A}. \quad (11)$$

Плотность ρ_A компонента А можно выразить из соотношения:

$$m_A = m_{\text{ff}} + m_{\text{cnt}} = \rho_A (V_{\text{ff}} + V_{\text{cnt}});$$

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

выражая объем через массу:

$$\rho_A = \frac{m_{\text{ff}} + m_{\text{cnt}}}{(m_{\text{ff}} / \rho_{\text{ff}} + m_{\text{cnt}} / \rho_{\text{cnt}})} = \rho_{\text{ff}} \rho_{\text{cnt}} \frac{m_{\text{ff}} + m_{\text{cnt}}}{m_{\text{ff}} \rho_{\text{cnt}} + m_{\text{cnt}} \rho_{\text{ff}}}. \quad (12)$$

Подставляя (12) в (11), (10) и (11) в (9), получим окончательную формулу для вычисления объемной доли УНТ в композите:

$$v_{\text{cnt_in_comp}} = \frac{m_{\text{cnt}} m_A \cdot \rho_{\text{ff}} \rho_B}{m_A \rho_B \cdot (m_{\text{ff}} \rho_{\text{cnt}} + m_{\text{cnt}} \rho_{\text{ff}}) + m_B \cdot \rho_{\text{ff}} \rho_{\text{cnt}} \cdot (m_{\text{ff}} + m_{\text{cnt}})}, \quad (13)$$

где m_{cnt} и m_{ff} — масса УНТ и магнитной жидкости при изготовлении компонента А; m_A и m_B — масса компонента А и В в итоговом композите; ρ_{ff} , ρ_{cnt} , ρ_B — плотности МЖ, УНТ и ЭС.

Диэлектрическая проницаемость образцов определяется по частотным зависимостям коэффициента отражения от периодической структуры с нарушением в виде исследуемого образца в ходе решения обратной двухпараметровой задачи. Подбираются такие параметры ε' и ε'' , при которых значение минимума, рассчитанное теоретически по формуле (7), совпадает с экспериментальным значением. Была определена комплексная диэлектрическая проницаемость эпоксидной смолы $\varepsilon_{\text{эпокс}} = 3,2 - 0,015i$ и композитов из Set А (табл. 2), высушенных при различных ориентациях вектора индукции магнитного поля $\varepsilon_{\text{comp||}}$, $\varepsilon_{\text{comp//}}$, $\varepsilon_{\text{comp}\perp}$ и без магнитного поля $\varepsilon_{\text{comp0}}$, по спектрам, изображенным на рис. 4. Проводимость образцов на СВЧ может быть вычислена из известного соотношения для мнимой части диэлектрической проницаемости:

$$\varepsilon''_{\text{comp}} = \frac{\sigma_{\text{comp}}}{\varepsilon_0 \omega},$$

где σ_{comp} — проводимость композита; ε_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума; ω — круговая частота СВЧ-излучения, при котором производилось измерение.

Таблица 2

Параметры композитов, высушенных при различной ориентации вектора индукции магнитного поля

	ε'	ε''	σ , Ом ⁻¹ м ⁻¹
$\varepsilon_{\text{comp0}}$	3,23	0,03	0,01
$\varepsilon_{\text{comp }}$	3,51	0,09	0,05
$\varepsilon_{\text{comp//}}$	3,32	0,05	0,03
$\varepsilon_{\text{comp}\perp}$	3,21	0,02	0,01

Для композита, в котором структуры ориентированы параллельно электрической компоненте СВЧ-волны, действительная и мнимая части диэлектрической проницаемости увеличиваются, а для перпендикулярной ориентации — уменьшаются, относительно образца, высушенного без магнитного поля.

Изучение влияния вытянутых структур в композитах на частотные зависимости коэффициента отражения производилось в программном пакете Ansys HFSS. Был смоделирован фотонный кристалл с нарушением в виде композита, высушенного в магнитном поле, ориентированном параллельно электрической компоненте СВЧ-волны из Set А (рис. 9).

Вытянутые структуры представляли собой лес из случайно разбросанных столбиков, состоящих из УНТ. Ширина основания столбиков определялась в результате статистического анализа фотографий с оптического микроскопа (см. рис. 1) с учетом поправки, связанной с наличием в структурах магнитной жидкости, которая вычислялась следующим образом. Объем МЖ в образцах в пять раз больше объема УНТ, тогда объем агломерата V_{agl} определяется соотношениями:

$$V_{\text{agl}} = V_{\text{ff}} + V_{\text{cnt}} = 5 \cdot V_{\text{cnt}} + V_{\text{cnt}} = 6 \cdot V_{\text{cnt}}; \quad (14)$$

$$V_{\text{cnt}} = d_{\text{cnt}}^2 \cdot h, \quad V_{\text{agl}} = d^2 h, \quad (15)$$

где d_{cnt} — искомая эффективная ширина основания столбика из УНТ; d — толщина структуры из МЖ—УНТ, определенная по фотографии; h — высота агломерата, равная высоте узкой стенки волновода. Подставляя (15) в (14), находим, что эффективная толщина агломератов из УНТ в 2,5 раза меньше, чем измеренная толщина структур МЖ—УНТ:

$$d_{\text{cnt}} = \sqrt{\frac{1}{6}} d \approx 0,4d. \quad (16)$$

Количество столбиков выбиралось таким, чтобы объемная доля, занимаемая ими, совпала с объемной долей УНТ в композите $v_{\text{cnt in comp}}$.

В качестве диэлектрической проницаемости столбиков было выбрано значение диэлектрической проницаемости включений из неориентированных УНТ $\varepsilon_{\text{cnt0}}$, вычисленное по формуле

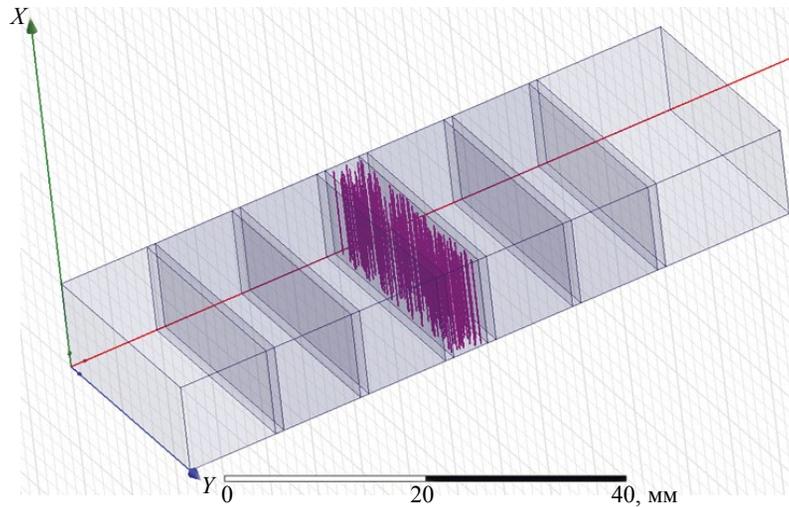


Рис. 9. Модель исследуемой в HFSS периодической структуры.

(8) для образца, высушенного без магнитного поля ($\epsilon_{\text{comp}0}$, см. табл. 2). Объемная доля включений из УНТ в исследуемом композите, рассчитанная по формуле (13), составила $v_{\text{cnt in comp}} = 0,65\%$. В качестве ρ_{cnt} принималось эффективное значение, определенное из эксперимента $\rho_{\text{cnt}} = \rho_{\text{cnt eff}} = 98,64$.

Рассчитанный спектр (рис. 10а, кривая 3) не совпал с экспериментальным (рис. 10а, кривая 2), что свидетельствует об изменении диэлектрической проницаемости и проводимости включений из УНТ при их выстраивании в вытянутые структуры.

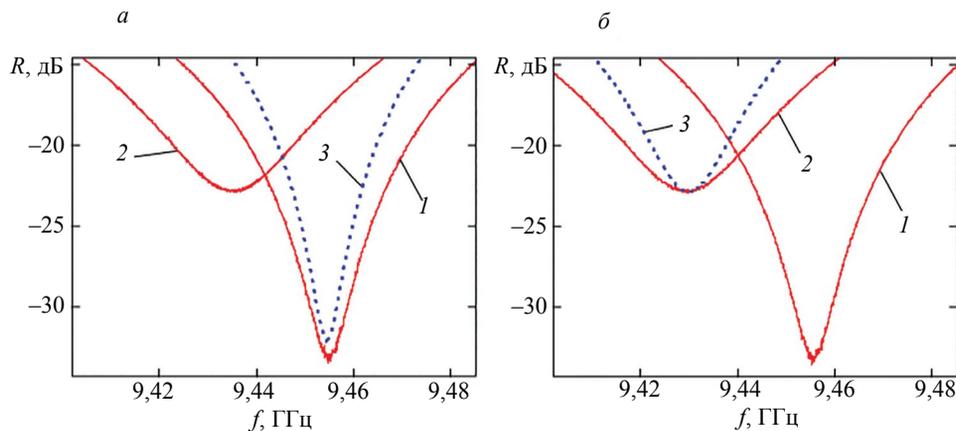


Рис. 10. Сравнение экспериментального спектра коэффициента отражения и рассчитанного в HFSS. Диэлектрическая проницаемость неориентированных включений $\epsilon_{\text{cnt}0}$ рассчитана для композита в отсутствии поля (а); подобрана численным методом в HFSS ($\epsilon_{\text{cnt}||}$)(б): 1 — экспериментальная частотная зависимость, при использовании композита, высушенного без магнитного поля, 2 — высушенного в магнитном поле, 3 — рассчитанная в HFSS.

Методом линейной интерполяции с использованием программного пакета Ansys HFSS удалось подобрать такие параметры $\epsilon_{\text{cnt}||}$; $\epsilon_{\text{cnt}\perp}$ (табл. 3), при которых теоретически рассчитанная зависимость (рис. 10а, кривая 3) совпала с экспериментальной (рис. 10б, кривая 2). Все три значения $\epsilon_{\text{cnt}0}$; $\epsilon_{\text{cnt}||}$; $\epsilon_{\text{cnt}\perp}$ оказались различны. Аналогичным образом были рассчитаны параметры графита при тех же объемных долях в композите, что и концентрация УНТ.

Углеродные нанотрубки обладают анизотропией электрофизических параметров, их значения могут отличаться на порядок в ортогональных направлениях (табл. 4). При приложении магнитного поля за счет влияния магнитной жидкости УНТ выстраиваются в вытянутые структуры. Анизотропия свойств композита ЭС—МЖ—УНТ определяется не только возникновением вытянутых структур, но и различной проводимостью самих струк-

Таблица 3

Электрофизические параметры включений из УНТ и графита, рассчитанные в ортогональных направлениях

	ϵ'	ϵ''	σ , Ом ⁻¹ м ⁻¹
$\epsilon_{\text{cnt}0}$	7,85	2,70	1,42
$\epsilon_{\text{cnt}\parallel}$	55,20	11,48	6,04
$\epsilon_{\text{comp}\perp}$	4,47	1,09	0,57
$\epsilon_{\text{gr}0}$	17,31	2,84	1,49
$\epsilon_{\text{gr}\parallel}$	23,49	4,15	2,18
$\epsilon_{\text{gr}\perp}$	12,91	2,16	1,13

Таблица 4

Степень анизотропии диэлектрической проницаемости и электропроводности композитов с УНТ и графитом

Композит	$\epsilon'_{\parallel}/\epsilon'_{\perp}$	$\sigma_{\parallel}/\sigma_{\perp}$
ЭС—МЖ—УНТ	12,3	10,6
ЭС—МЖ—Гр	1,8	1,9

тур в ортогональных направлениях, обусловленной ориентированием УНТ. Степень анизотропии свойств вытянутых структур, образованных из графита (см. табл. 4), существенно ниже, чем из УНТ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На частотной зависимости коэффициента отражения от СВЧ-волноводного фотонного кристалла с нарушением в виде измеряемого образца наблюдается резкий минимум, который сильно изменяется по величине и частоте, что открывает возможность исследовать параметры композитов.

Композиты из эпоксидной смолы и суспензии магнитной жидкости с углеродными нанотрубками или графитом, изготовленные при приложении магнитного поля, обладают анизотропией электрофизических свойств. Ее проявление обусловлено образованием в объеме композита вытянутых проводящих структур. Композиты с углеродными нанотрубками обладают большей анизотропией электрофизических свойств, чем композиты с графитом.

Выявлено, что направление вектора индукции магнитного поля, воздействующего на образец в процессе его изготовления, влияет на коэффициент отражения СВЧ-волны: параллельное направление электрической компоненте СВЧ-волны увеличивает, а перпендикулярное — уменьшает. Это обусловлено образованием вытянутых структур, что подтверждается моделированием, произведенным в программе AnsysHFSS. При расчете проводимости структур из углеродных нанотрубок, следует учитывать анизотропию электропроводности самих углеродных нанотрубок. Учет анизотропии свойств углеродных нанотрубок позволяет с большей точностью контролировать электрофизические параметры композитных материалов на основе углеродных нанотрубок.

Определена величина индукции магнитного поля, при котором процессы структурообразования выходят на насыщение. Большие значения индукции магнитного поля приводят к неоднородному распределению структур в образце.

Выявлено, что существует предельное значение концентрации суспензии магнитная жидкость — углеродные нанотрубки в эпоксидной смоле, после которого анизотропия свойств снижается. При больших концентрациях суспензии процессы структурообразования ухудшаются, что может быть связано с изменением реологических свойств суспензии в ходе изготовления композита.

Снижение анизотропии минимума коэффициента отражения происходит также при большом отношении массы углеродных нанотрубок к массе магнитной жидкости, т.к. малое количество магнитной жидкости не способно выстроить однородно вдоль направления магнитного поля большое количество УНТ.

Таким образом, была определена степень анизотропии электрофизических свойств в сверхвысокочастотном диапазоне длин волн композитов эпоксидная смола — магнитная жидкость — углеродные нанотрубки и эпоксидная смола — магнитная жидкость — графит, что открывает новые возможности при создании материалов с управляемыми параметрами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Gholizadeh S.* A review of non-destructive testing methods of composite materials // *Procedia Structural Integrity*. 2016. V. 1. P. 050—057. DOI: 10.1016/j.prostr.2016.02.008
2. *Mohammed S.R., Mohamed A. Abou-Khousa, Muhammad F.A.* A review on microwave non-destructive testing (NDT) of composites // *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2024. V. 58. Art. No. 101848. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2024.101848>
3. *Казьмин А.И., Федюнин П.А., Федюнин Д.П.* Контроль диэлектрической проницаемости и толщины анизотропных диэлектрических покрытий методом поверхностных электромагнитных волн // *Дефектоскопия*. 2021. № 6. С. 57—72.
4. *Vegesna S., Irin F., Green M., Sae M.* Non-destructive technique for broadband characterization of carbon nanotubes at microwave frequencies // *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*. 2013. V. 27. No. 11. P. 1372—1381. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/09205071.2013.808968>
5. *Бочкова Т.С., Игонин С.В., Усанов Д.А., Постельга А.Э.* Определение параметров магнитной жидкости по температурной зависимости спектра отражения сверхвысокочастотного излучения с учетом образованных агломератов ферромагнитных наночастиц // *Дефектоскопия*. 2018. № 8. С. 41—49. DOI: 10.1134/S0130308218080055
6. *Hughes K.J., Iyer K.A., Bird R.E., Ivanov J., Banerjee S., Georges G., Zhou Q.A.* Review of Carbon Nanotube Research and Development Materials and Emerging Applications // *ACS Appl. Nano Mater.* 2024. V. 7. P. 18695—18713. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsanm.4c02721>
7. *Balgoria P.K., Harris Samuel D.G., Thumu U.* A review on mechanical properties of epoxy nanocomposites // *Materials Today: Proceedings*. 2021. V. 44. Part 1. P. 346—355. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.742>
8. *Ogbonna V.E., Popoola A.P.I., Popoola O.M.* A review on recent advances on the mechanical and conductivity properties of epoxy nanocomposites for industrial applications // *Polymer Bulletin*. 2023. V. 80. P. 3449—3487. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00289-022-04249-4>
9. *Singh B.P., Verma P., Veena C., Saini P., Pande S., Singh V.N., Mathur R.B.* Enhanced microwave shielding and mechanical properties of high loading MWCNT—epoxy composites // *J. Nanopart Res.* 2013. V. 15. No. 4. Art. No. 1554. DOI: 10.1007/s11051-013-1554-0
10. *Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Романов А.В.* Комплексная диэлектрическая проницаемость композитов на основе диэлектрических матриц и входящих в их состав углеродных нанотрубок // *ЖТФ*. 2011. Т. 81. № 1. С. 106—110.
11. *Valdirene Aparecida da Silva, Rezende M.C.* S-parameters, electrical permittivity, and absorbing energy measurements of carbon nanotubes-based composites in X-band // *J. Appl. Polym. Sci.* 2020. V. 138. No. 7. P. 1—10. DOI: 10.1002/app.49843
12. *Воробьева Е.А., Евсеев А.П., Петров В.Л., Шемухин А.А., Чеченин Н.Г.* Проводимость в композитных материалах на основе ориентированных углеродных нанотрубок // *ВМУ. Серия 3. Физика. Астрономия*. 2021. № 1. С. 23—29
13. *Vovchenko L.L., Zagorodnii V.V., Yakovenko O.S., Matzui L.Yu., Oliynyk V.V., Launets V.L.* Microwave Properties and Conductivity Anisotropy of Oriented Multiwalled Carbon Nanotube/Epoxy Composites // *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2016. V. 38. No. 5. P. 657—668. DOI: 10.15407/mfint.38.05.0657
14. *Kim I.T., Tannenbaum A., Tannenbaum R.* Anisotropic conductivity of magnetic carbon nanotubes embedded in epoxy matrices // *Carbon*. 2011. V. 49. No. 1. P. 54—61. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2010.08.041>
15. *Shahsavari A., Salimpour M.R., Saghaftan M., Shafii M.B.* Effect of magnetic field on thermal conductivity and viscosity of a magnetic nanofluid loaded with carbon nanotubes // *J. Mech. Sci. Technol.* 2016. V. 30. No. 2. P. 809—815. DOI: 10.1007/s12206-016-0135-4
16. *Vales-Pinzón C., Alvarado-Gil J.J., Medina-Esquivel R., Martínez-Torres P.* Polarized light transmission in ferrofluids loaded with carbon nanotubes in the presence of a uniform magnetic field // *J. Magn. Magn. Mat.* 2014. V. 369. P. 114—121. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2014.06.025>
17. *Dotsenko O.A., Pavlova A.A., Dotsenko V.S.* The effect of external magnetic field on dielectric permeability of multiphase ferrofluids // *Russian Physics Journal*. 2018. V. 60. N. 11. P. 1955—1960. DOI: 10.1007/s11182-018-1308-7
18. *Туркин С.Д., Диканский Ю.И.* Особенности отражения электромагнитных волн СВЧ-диапазона от магнитных коллоидов // *ЖТФ*. 2021. Т. 91. № 1. С. 131—138.
19. *Sloan R., Stakenborghs R.J.* Recent Developments in the Industrial Application of Microwave NDT / Sensors and Communication Technologies in the 1 GHz to 10 THz Band. 2024 Proceedings Volume 13203. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.3037072>
20. *Усанов Д.А., Никитов С.А., Скрипаль А.В., Пономарев Д.В., Латышева Е.В.* Измерения электрофизических характеристик полупроводниковых структур с использованием СВЧ фотонных кристаллов // *Известия вузов. Электроника*. 2016. Т. 21. № 2. С. 187—194
21. *Скрипаль А.В., Пономарев Д.В., Комаров А.А., Шаронов В.Е.* Использование таммовских резонансов в СВЧ фотонных кристаллах для измерения параметров полупроводниковых слоев // *СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии*. 2022. В. 4. С. 161—162.
22. *Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В., Боголюбов А.С.* Измерения толщины нанометровых слоев металла и электропроводности полупроводника в структурах металл—полупроводник по

спектрам отражения и прохождения электромагнитного излучения // ЖТФ. 2006. Т. 76. №. 5. С. 112—117.

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

REFERENCES

1. *Gholizadeh S.* A review of non-destructive testing methods of composite materials // *Procedia Structural Integrity*. 2016. V. 1. P. 050—057. DOI: [10.1016/j.prostr.2016.02.008](https://doi.org/10.1016/j.prostr.2016.02.008)
2. *Mohammed S.R., Mohamed A. Abou-Khousa, Muhammad F.A.* A review on microwave non-destructive testing (NDT) of composites // *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2024. V. 58. Art. No. 101848. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2024.101848>
3. *Kaz'min A.I., Fedyunin P.A., Fedyunin D.P.* Evaluation of Permittivity and Thickness Gaging for Anisotropic Dielectric Coatings by the Method of Surface Electromagnetic Waves // *Defektoskopiya*. 2021. No. 6. P. 57—72.
4. *Vegesna S., Irin F., Green M., Sae M.* Non-destructive technique for broadband characterization of carbon nanotubes at microwave frequencies // *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*. 2013. V. 27. No. 11. P. 1372—1381. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/09205071.2013.808968>
5. *Bochkova T.S., Igonin S.V., Usanov D.A., Postelga A.É.* Determining Parameters of a Ferrofluid Based on the Temperature Dependence of Microwave Reflection Spectrum with Allowance for the Formed Agglomerates of Ferromagnetic Nanoparticles // *Defektoskopiya*. 2018. No. 8. P. 41—49. DOI: [10.1134/S0130308218080055](https://doi.org/10.1134/S0130308218080055)
6. *Hughes K.J., Iyer K.A., Bird R.E., Ivanov J., Banerjee S., Georges G., Zhou Q.A.* Review of Carbon Nanotube Research and Development Materials and Emerging Applications // *ACS Appl. Nano Mater.* 2024. V. 7. P. 18695—18713. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsanm.4c02721>
7. *Balguria P.K., Harris Samuel D.G., Thumu U.* A review on mechanical properties of epoxy nanocomposites // *Materials Today: Proceedings*. 2021. V. 44. Part 1. P. 346—355. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.742>
8. *Ogbonna V.E., Popoola A.P.I., Popoola O.M.* A review on recent advances on the mechanical and conductivity properties of epoxy nanocomposites for industrial applications // *Polymer Bulletin*. 2023. V. 80. P. 3449—3487. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00289-022-04249-4>
9. *Singh B.P., Verma P., Veena C., Saini P., Pande S., Singh V.N., Mathur R.B.* Enhanced microwave shielding and mechanical properties of high loading MWCNT—epoxy composites // *J. Nanopart Res.* 2013. V. 15. No. 4. Art. No. 1554. DOI: [10.1007/s11051-013-1554-0](https://doi.org/10.1007/s11051-013-1554-0)
10. *Usanov D.A., Skripal A.V., Romanov A.V.* Complex permittivity of composites based on dielectric matrices with carbon nanotubes // *Technical Physics*. 2011. V. 56. No. 1. P. 102—106. DOI: [10.1134/S1063784211010257](https://doi.org/10.1134/S1063784211010257)
11. *Valdirene Aparecida da Silva, Rezende M.C.* S-parameters, electrical permittivity, and absorbing energy measurements of carbon nanotubes-based composites in X-band // *J. Appl. Polym. Sci.* 2020. V. 138. No. 7. P. 1—10. DOI: [10.1002/app.49843](https://doi.org/10.1002/app.49843)
12. *Vorob'eva E.A., Evseev A.P., Petrov V.L., Shemukhin A.A., Chechenin N.G.* The conductivity in Composite Materials Based on Oriented Carbon Nanotubes // *Moscow University Physics Bulletin*. 2021. V. 76. No. 1. P. 29—35. DOI: [10.3103/S0027134921010112](https://doi.org/10.3103/S0027134921010112)
13. *Vovchenko L.L., Zagorodnii V.V., Yakovenko O.S., Matzui L.Yu., Oliyynyk V.V., Launets V.L.* Microwave Properties and Conductivity Anisotropy of Oriented Multiwalled Carbon Nanotube/Epoxy Composites // *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2016. V. 38. No. 5. P. 657—668. DOI: [10.15407/mfint.38.05.0657](https://doi.org/10.15407/mfint.38.05.0657)
14. *Kim I.T., Tannenbaum A., Tannenbaum R.* Anisotropic conductivity of magnetic carbon nanotubes embedded in epoxy matrices // *Carbon*. 2011. V. 49. No. 1. P. 54—61. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2010.08.041>
15. *Shahsavari A., Salimpour M.R., Saghafian M., Shafii M.B.* Effect of magnetic field on thermal conductivity and viscosity of a magnetic nanofluid loaded with carbon nanotubes // *J. Mech. Sci. Technol.* 2016. V. 30. No. 2. P. 809—815. DOI: [10.1007/s12206-016-0135-4](https://doi.org/10.1007/s12206-016-0135-4)
16. *Vales-Pinzón C., Alvarado-Gil J.J., Medina-Esquivel R., Martínez-Torres P.* Polarized light transmission in ferrofluids loaded with carbon nanotubes in the presence of a uniform magnetic field // *J. Magn. Magn. Mat.* 2014. V. 369. P. 114—121. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2014.06.025>
17. *Dotsenko O.A., Pavlova A.A., Dotsenko V.S.* The effect of external magnetic field on dielectric permeability of multiphase ferrofluids // *Russian Physics Journal*. 2018. V. 60. N. 11. P. 1955—1960. DOI: [10.1007/s11182-018-1308-7](https://doi.org/10.1007/s11182-018-1308-7)
18. *Turkin S.D., Dikansky Yu.I.* Peculiarities of Reflection of Electromagnetic Waves in the Microwave Range from Magnetic Colloids // *Technical Physics*. 2021. V. 66. No. 1. P. 124—132. DOI: [10.1134/S1063784221010229](https://doi.org/10.1134/S1063784221010229)
19. *Sloan R., Stakenborghs R.J.* Recent Developments in the Industrial Application of Microwave NDT / Sensors and Communication Technologies in the 1 GHz to 10 THz Band. 2024 Proceedings Volume 13203. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.3037072>

20. *Usanov D.A., Nikitov S.A., Skripal A.V., Ponomarev D.V., Latysheva E.V.* Measurements of electrophysical characteristics of semiconductor structures with the use of microwave photonic crystals // *Semiconductors*. 2016. V. 50. No. 13. P. 1759—1763. DOI: 10.1134/S1063782616130091
21. *Skripal A.V., Ponomarev D.V., Komarov A.A., Sharonov V.E.* Tamm resonances control in one-dimensional microwave photonic crystal for measuring parameters of heavily doped semiconductor layers // *Izvestiya of Saratov University Physics*. 2022. V. 22. No. 2. P. 123—130. DOI: 10.18500/1817-3020-2022-22-2-123-130
22. *Usanov D.A., Skripal A.V., Abramov A.V., Bogolyubov A.S.* Determination of the metal nanometer layer thickness and semiconductor conductivity in metal-semiconductor structures from electromagnetic reflection and transmission spectra // *Technical Physics*. 2006. V. 51. No. 5. P. 644—649. DOI: 10.1134/S1063784206050173
23. *Sushko M., Kris'kiv S.K.* Compact group method in the theory of permittivity of heterogeneous systems // *Technical Physics*. 2009. V. 54. No. 3. P. 423—427. DOI: 10.1134/S1063784209030165
-