

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ
Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра физики твёрдого тела



**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАГНИТНЫХ КОМПОЗИТОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ
УПРАВЛЯЕМЫХ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ СВЧ-ДИАПАЗОНА**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ ДИПЛОМНОЙ РАБОТЫ

Студентки 4 курса 4051 группы
Направления 11.03.04 «Электроника и микроэлектроника»
Института физики

Агаповой Юлии Александровны

Научный руководитель

к.ф.- м.н., доцент

должность, уч. степень, уч. звание



18.06.2024

подпись, дата

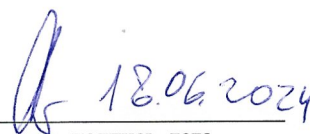
А. Э. Постельга

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой

д.ф.- м.н., профессор

должность, уч. степень, уч. звание



18.06.2024

подпись, дата

Ал.В. Скрипаль

инициалы, фамилия

Саратов 2024 год

Введение

Магнитная жидкость, или феррожидкость, является специальным типом жидкости, содержащей в себе наночастицы ферромагнитных веществ, таких как железо, никель или кобальт. Эти наночастицы обладают свойством магнитной восприимчивости, то есть они могут подвергаться воздействию магнитного поля.

Магнитные жидкости обладают уникальными свойствами, такими как способность к перемещению под воздействием магнитного поля, изменение вязкости под влиянием магнитного поля, а также возможность формирования различных форм и структур под воздействием внешних магнитных полей.

СВЧ фотонный кристалл – это материал с упорядоченной структурой, характеризующейся строго периодическим изменением коэффициента преломления в масштабах, сопоставимых с длинами волн излучений в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах.

Электрофизические свойства СВЧ фотонного кристалла связаны с его способностью управлять СВЧ излучением. Кристалл может действовать как фильтр, отражатель, пропускатель или щелевой передатчик в зависимости от его конфигурации и настройки.

Фотонный кристалл в общем случае представляет собой регулярную структуру, в которой периодически чередуются области высокой и низкой плотности фотонов. Нарушенный слой в фотонном кристалле может возникать в результате дефектов структуры, например, из-за наличия дополнительных или отсутствующих элементов в решетке, или из-за неоднородностей в материале.

Нарушенный слой может привести к изменению оптических свойств фотонного кристалла, таких как поглощение, рассеяние или отражение света. Кроме того, нарушенный слой может влиять на прохождение фотонов через кристалл и изменять характеристики его пропускания света.

Актуальность использования магнитных композитов для создания управляемых фотонных кристаллов СВЧ-диапазона обусловлена широким применением магнитных материалов в различных областях, таких как фильтры, сердечники СВЧ-индукторов и подложки для миниатюрных антенн.

Целью данной работы: показать возможность использования магнитных композитов для создания управляемых фотонных кристаллов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести критический анализ научной литературы, посвященной изучению магнитной жидкости;
2. Провести критический анализ научной литературы, посвященной изучению фотонных кристаллов;
3. Разработать технологии изготовления образцов композита магнитная жидкость-эпоксидная смола;
4. Провести измерение коэффициентов отражения при различных углах приложения магнитного поля и при его отсутствии;
5. Провести экспериментальное исследование амплитудно-частотных характеристик коэффициента отражения электромагнитного излучения СВЧ-диапазона, взаимодействующего с фотонным кристаллом.

Работа занимает 42 страницы и включает в себя 11 рисунков, список использованных источников, состоящий из 47 наименований.

Основное содержание работы

Во введение рассматривается актуальность работы, определяется цель и задачи исследования. Описываются основные понятия, свойства материалов и характеристики.

Первая глава посвящена рассмотрению взаимодействия СВЧ-излучения с магнитной жидкостью. Магнитная жидкость представляет собой коллоидный раствор ферромагнитных частиц, покрытых слоем поверхностно-активного вещества, в немагнитной жидкости-носителе.

Взаимодействие СВЧ-излучения с магнитной жидкостью открывает множество возможностей для применения в разных областях науки и техники.

Управление поведением магнитной жидкости возможно благодаря магнитным полям. Это позволяет создавать контролируемые потоки магнитной жидкости и окружающих немагнитных сред. Такие течения позволяют

разрабатывать различные устройства, такие как насосы, клапаны, дозаторы и микророботы.

В настоящее время активно изучаются резонансные свойства ансамблей, слабо взаимодействующих магнитных наночастиц [1-3]. Много исследований посвящено магнитному резонансу образцов в виде порошков и магнитных плёнок из ультрадисперсных наночастиц, полученных измельчением монокристаллов и поликристаллов разного химического состава [4-7]. Исследования показывают, что хорошей физической моделью является представление о том, что каждой частице приписывается единый магнитный момент.

В этом контексте представляет интерес изучение магнитных нанокolloидов (магнитных жидкостей), где ансамбль ультрадисперсных частиц с общим магнитным моментом распределён в немагнитной среде. Взаимодействие таких жидкостей с электромагнитными полями СВЧ также имеет резонансный характер, который ранее был теоретически рассмотрен в работах [8-10]. Ферромагнитный резонанс в таких средах приблизительно описывается теорией динамического намагничивания однодоменной частицы во внутреннем поле анизотропии и внешнем магнитном поле.

Во второй главе рассмотрены электрофизические свойства СВЧ фотонного кристалла.

СВЧ-фотонный кристалл применяется в различных областях, включая радиосвязь, оптические связи, квантовую оптику и оптическую электронику. Он может иметь разные формы, такие как плоские пластины, цилиндры, сферы и другие геометрические фигуры.

Один из примеров использования СВЧ-фотонных кристаллов — создание фильтров, способных избирательно пропускать или отражать определённые диапазоны частот. Это полезно при разработке устройств для беспроводной связи, где требуется отфильтровывать помехи и внешние воздействия.

Также СВЧ-фотонные кристаллы используются для создания полосовых фильтров, перестраиваемых резонаторов и миниатюрных антенн. Они также

применяются в лазерной технике для получения маломощной лазерной генерации и создания сред с отрицательным показателем преломления.

К основным электрофизическим свойствам СВЧ фотонного кристалла относят:

1. Пропускание и отражение СВЧ излучения. Кристалл может быть настроен для пропускания излучения определенной длины волны, при этом излучение других длин волн будет отражено.

2. Дисперсия фазы. СВЧ фотонный кристалл может изменять фазу проходящего через него излучения в зависимости от его длины волны. Это свойство может быть использовано для создания фазовых решеток и других оптических устройств.

3. Дифракция. СВЧ фотонный кристалл является периодической структурой, что приводит к возникновению дифракционных эффектов при прохождении через него излучения.

4. Дисперсия групповой скорости. Изменение расстояния между препятствиями в кристалле приводит к изменению групповой скорости проходящего через него излучения.

Все эти свойства могут быть использованы для создания СВЧ оптических устройств, например, в фотонике для управления и регулирования СВЧ излучения в микроволновых устройствах.

Электрофизические свойства СВЧ фотонного кристалла включают высокий коэффициент отражения электромагнитной волны в запрещённой зоне и отражательные свойства, которые могут быть использованы для создания систем с разрешённой зоной с частотно-независимым коэффициентом прохождения, близким к единице. Также важным свойством является возможность создания узкополосных фильтров заграждения с высоким подавлением сигнала и частотно-независимым коэффициентом прохождения.

Нарушенный слой в СВЧ фотонном кристалле — это слой, в котором нарушена периодичность структуры кристалла, что приводит к возникновению

диффузионных мод. Такой слой может быть создан, например, путём введения дополнительных дефектов в кристаллическую решётку или изменения её формы.

Нарушенный слой может быть использован для создания фильтров или источников света в оптических системах. Он может использоваться для создания высоконаправленных антенн, СВЧ-фильтров, улучшения характеристик СВЧ-детекторов и усилителей. Также он применяется для неразрушающего контроля структур с нанометровыми полупроводниковыми слоями и повышения чувствительности коэффициента отражения S_{11} к изменению удельной электропроводности полупроводниковых пластин. Однако он также может привести к рассеянию СВЧ волны, что приводит к потере энергии и снижению эффективности кристалла. Это особенно верно для случая, когда нарушенный слой находится на расстоянии порядка длины волны СВЧ, что может привести к конструктивной интерференции и дополнительным потерям энергии.

Также нарушенный слой может изменить оптические свойства кристалла, что может привести к изменению характеристик прохождения света и функционирования кристалла в целом. Например, нарушенный слой может изменить показатели преломления СВЧ волн или компенсировать их изменение в кристалле, что может привести к изменению оптической линии передачи кристалла.

Кроме того, нарушенный слой может оказывать влияние на свойства локальных уровней возбуждения кристалла, таких как собственные колебания, плазмонные моды и так далее.

Фотонные кристаллы — это искусственно созданные периодические гетерогенные среды, которые относятся к классу метаматериалов. Периодические фотонные структуры СВЧ-диапазона имеют очень важное практическое применение в системах связи и телекоммуникаций, при создании антенн, радарной техники и измерительного оборудования [11, 12].

Исследование возможностей электрического контроля амплитудно-частотных характеристик СВЧ фотонных кристаллов предполагает изучение свойств и разработку метаматериалов, таких как фотонные кристаллы. Один из

методов заключается в моделировании и создании периодической фотонной структуры СВЧ-диапазона, состоящей из регулярно расположенных слоёв керамики Al_2O_3 и пенопласта. В эту структуру может быть включён слой магнитной жидкости, нарушающий периодичность. Эксперименты по изучению амплитудно-частотных характеристик коэффициента пропускания электромагнитного излучения СВЧ-диапазона, взаимодействующего с полученным фотонным кристаллом, позволяют определить возможность электрического управления свойствами кристалла.

Экспериментально продемонстрирована возможность электрического управления амплитудно-частотными характеристиками СВЧ фотонных кристаллов [13]. Также показано, что приложение магнитного поля к нарушенному слою влияет на характеристики фотонного кристалла, такие как коэффициент пропускания фотонного кристалла, и изменяет амплитуду и частоту пиков [14]. Управление шириной запрещённой зоны фотонного кристалла возможно при приложении магнитного поля к нарушенному слою.

В третьей главе описано экспериментальное исследование амплитудно-частотных характеристик коэффициента отражения электромагнитного излучения СВЧ-диапазона.

В исследовании изучались образцы композита эпоксидная смола — магнитная жидкость — многостенные углеродные нанотрубки. Магнитная жидкость представляла собой однородную взвесь однодоменных частиц магнетита в керосине, стабилизированных олеиновой кислотой с такими параметрами: диаметр ферромагнитных частиц — 10 нм, объёмная доля твёрдой фазы — 0,14. Наночастицы магнетика были получены способом, аналогичным [41]. Образцы изготавливались попарно.

Высушивание первого образца проводилось без магнитного поля, в результате чего получался композит эпоксидной смолы с каплями микронных размеров, состоящими из магнитной жидкости и углеродных нанотрубок. Второй образец высушивался в присутствии магнитного поля с индукцией 130 мТ, благодаря чему в эпоксидной смоле образовывались вытянутые структуры в

виде длинных «проволок» из магнитной жидкости и углеродных нанотрубок. Высушивание проводилось при разных направлениях магнитного поля, угол между вектором индукции магнитного поля и электрической компонентой СВЧ волны в волноводе менялся от 0° до 90° . Во всех образцах массовая доля углеродных нанотрубок была одинаковой и составляла она 0,05%.

Была предпринята попытка использования кюветы с магнитной жидкостью в качестве нарушенного слоя. Кювета состояла из двух параллельных пластин из оргстекла размером 23,0 x 10,0 x 0,8 мм, соединённых эпоксидной смолой по периметру. Магнитная жидкость помещалась в кювету через технологический зазор, который расположен на коротком торце кюветы. Толщина слоя магнитной жидкости в кювете составляла 1 мм.

Было обнаружено, что при воздействии магнитного поля на слой магнитной жидкости появляется возможность управлять характеристиками фотонного кристалла в широком диапазоне. Однако наличие кюветы затрудняет теоретическое описание фотонной структуры, так как магнитная жидкость не полностью заполняет поперечное сечение волновода. По периметру расположена эпоксидная смола шириной около 1 мм, которая соединяет стенки кюветы, а магнитная жидкость находится в центральной части волновода.

Размещение магнитной жидкости непосредственно в волноводе вызывает технологические сложности, связанные с герметизацией жидкости между тонкими диэлектрическими вставками фотонного кристалла.

В этой работе предлагается закрепить магнитную жидкость в твёрдой матрице. Образцы представляют собой композит из эпоксидной смолы и магнитной жидкости. Изготовление образцов происходит следующим образом: подготавливаются четыре силиконовые формы, в качестве мастер-модели используется фторопластовый образец с размерами 25,0 x 10,0 x 4,0 мм, расположенный вертикально. Компоненты эпоксидной смолы и магнитной жидкости взвешиваются и подвергаются механическому перемешиванию в течение 5 минут. Полученной эмульсией заполняются силиконовые формы. Образцы извлекаются через сутки и стачиваются с торца до ширины 23,0 мм,

которая равна размеру широкой стенки волновода. Срезанный край размещается возле узкой стенки волновода, где электрическое поле СВЧ минимально. Таким образом, удаётся уменьшить погрешность измерений, связанную с несовершенством геометрической формы образца.

Проводилось экспериментальное исследование амплитудно-частотных характеристик коэффициента отражения электромагнитного излучения СВЧ-диапазона, взаимодействующего с фотонным кристаллом, аналогичным [40], состоящим из одиннадцати периодически чередующихся слоев (рис. 1). Слои полностью заполняли поперечное сечение прямоугольного волновода размером 23 x 10 мм. Нечетные слои представляли собой пластины из керамики (Al_2O_3 , $\epsilon_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 9,6$), четные — из фторопласта ($\epsilon_{\text{fpr}} = 2$). Толщина нечетных отрезков $d_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 1,0$ мм, четных $d_{\text{fpr}} = 10$ мм. Измеряемые образцы располагались в центральном слое и представляли собой нарушение периодичности фотонной структуры. Измерение АЧХ коэффициента отражения исследуемого фотонного кристалла в трехсантиметровом диапазоне длин волн проводились с использованием СВЧ-анализатора цепей AgilentTech. 5242A PNA-XNetworkAnalyzer.

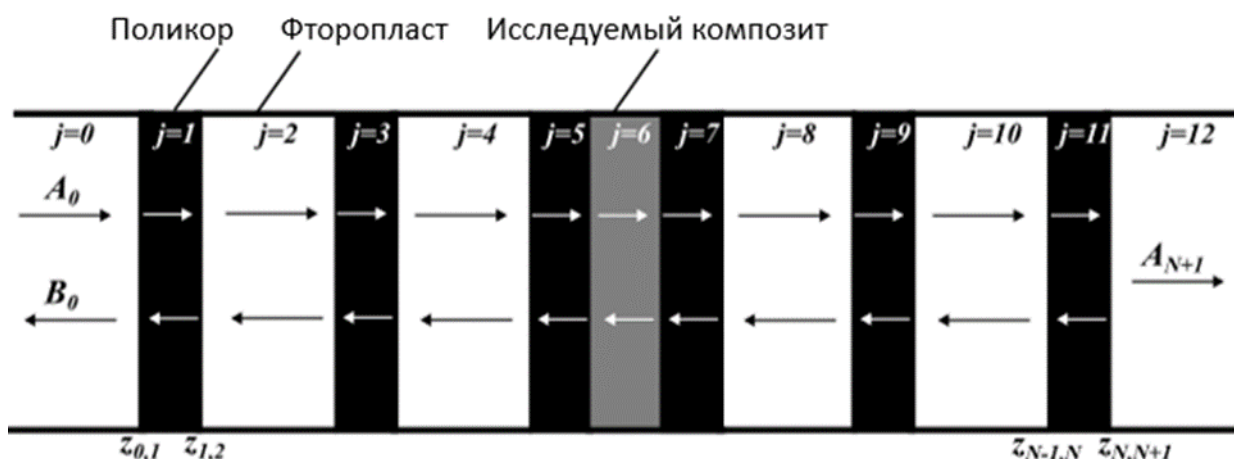


Рисунок 1 – Исследуемая периодическая 11-слойная структура, в качестве нарушения периодичности используется изготовленный образец

Добавление УНТ в композит приводит к увеличению его проводимости, как следствие, наблюдается возрастание коэффициента отражения от образцов с увеличением массовой доли УНТ. Коэффициент отражения возрастает сильнее

для образцов, высушенных в присутствии магнитного поля. При перпендикулярной ориентации вектора индукции магнитного поля и электрической компоненты СВЧ волны наблюдается уменьшение коэффициента отражения (рис. 2, кривая 4). При угле, равном 45° , пиковое значение коэффициента отражения возрастает (рис. 2, кривая 3). Максимального значения коэффициент отражения достигает при высушивании образцов в магнитном поле, ориентированном в направлении электрической компоненты СВЧ волны (рис. 2, кривая 2). Данная зависимость пика коэффициента отражения от ориентации магнитного поля (рис. 2) объясняется следующим образом: параллельная ориентация нитевидных структур и электрической составляющей СВЧ волны в волноводе приводит к более эффективному взаимодействию электромагнитного излучения с композитом и увеличению эффективной проводимости образца, относительно композита, высушенного без магнитного поля. При перпендикулярной ориентации наблюдается снижение эффективной проводимости композита, вследствие чего, отражательная способность образца снижается.

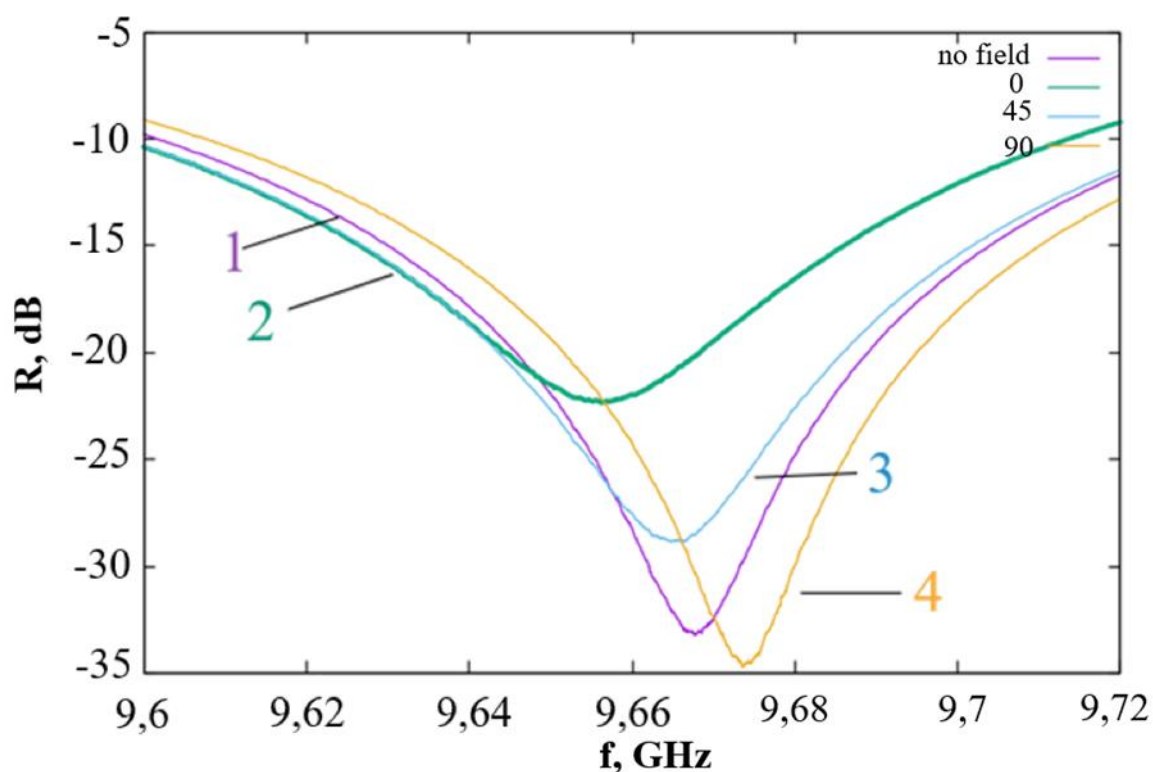


Рисунок 2 – Частотная зависимость коэффициента отражения от периодической структуры с нарушением в виде исследуемого образца: 1 — образец, высушенный без магнитного поля, 2 — магнитное поле приложено параллельно электрической компоненте СВЧ волны (под углом 0°), 3 — магнитное поле приложено под углом 45° , 4 — магнитное поле приложено под углом 90° [15]

В отсутствии магнитного поля на частотных зависимостях коэффициента отражения СВЧ излучения имеется пик отражения в виде резкого минимума. С увеличением магнитного поля значение минимума коэффициента отражения также увеличивается (рис. 3.2.4а).

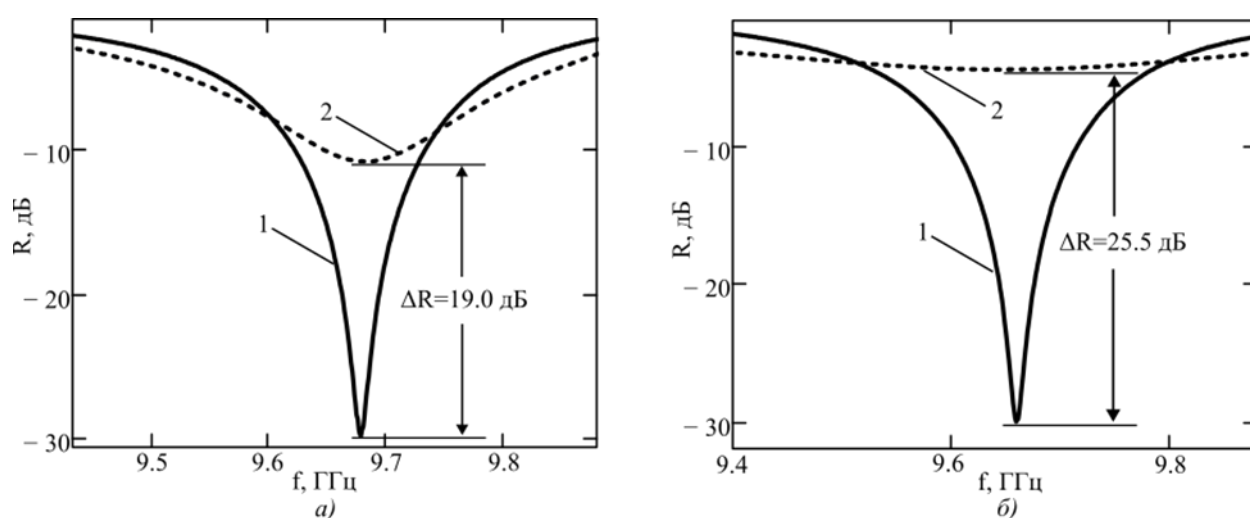


Рис. 3.2.4. Частотные зависимости коэффициента отражения электромагнитной волны СВЧ диапазона от фотонной структуры, в качестве нарушения используется композит с объемной долей магнитной жидкости 0.350:

а) образец № 1.8 без аэросила, кривая 1 – в отсутствии магнитного поля, кривая 2 – при приложении магнитного поля индукцией 300 мТл.

б) образец №2.8 с объемной долей аэросила 0.010, кривая 1 – в отсутствии магнитного поля, кривая 2 – при приложении магнитного поля индукцией 330 мТл.

Заключение.

Таким образом, была продемонстрирована возможность создания композитов на основе твёрдой эпоксидной матрицы с магнитной жидкостью и углеродными нанотрубками, которые обладают анизотропией электрических свойств в сантиметровом диапазоне длин волн.

Был разработан фотонный кристалл с нарушением в виде слоя композита магнитной жидкости в эпоксидной матрице. Магнитное поле, приложенное к этому слою, позволяет управлять свойствами фотонного кристалла. В отсутствие магнитного поля на частотной зависимости коэффициента отражения электромагнитного излучения СВЧ диапазона от фотонного кристалла наблюдается резкий пик с минимальным значением коэффициента отражения. При приложении магнитного поля к нарушенному слою минимальное значение коэффициента отражения начинает увеличиваться до максимального значения, что приводит к подавлению пика. При дальнейшем увеличении индукции магнитного поля минимальное значение коэффициента отражения возвращается к исходному значению.

Подавление пика коэффициента отражения при воздействии магнитного поля увеличивается с ростом объёмной доли магнитной жидкости. Однако при высоких объёмных долях магнитной жидкости происходит её оседание, что приводит к уменьшению подавления пика. Добавление загустителя «Аэросил» в композит позволяет получить гомогенный образец, благодаря чему подавление пика коэффициента отражения продолжает расти даже при высоких объёмных долях магнитной жидкости.

Список использованных источников

1. P.E. Junnson. Adv. Chem. Phys., 128, 191 (2004).
2. O. Petracie, X. Chen, S. Bedanta, W. Kleeman, S. Sahoo, S. Cardoso, P.P. Freitas. J. Magn. Magn. Mater., 300, 192(2006).
3. А.В. Горобинский. Ферромагнитный резонанс в композиционных магнитных наноструктурах. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физ.-мат.наук. (Краснодар, 2011)
4. Yu.A. Koksharov, D.A. Pankratov, S.P. Gubin, I.D. Kossobudsky, M. Beltran, Y. Khodorkovsky, A.M. Tishin. J. Appl. Phys., 89, 2293 (2001)
5. С.А. Вызулин, Ю.Е. Калинин, Г.Ф. Копытов. Известия высших учебных заведений. Физика. 49 (3), 40 (2006).
6. С.П. Губин, Ю.А. Кокшаров, Г.Б. Хомутов. Успехи химии, 74 (6), 540-573 (2005).
7. С.А. Вызулин, А.В. Горобинский, Е.В. Лебедева, Н.Е. Сырьев. Исследование многослойных наноструктурных пленок методом ферромагнитного резонанса. Сборник научных трудов IV Всероссийской конференции «физические свойства металлов и сплавов». (Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2007).
8. Ю.Л. Райхер, В.А. Игнатченко, М. И. Шлиомис. ЖЭТФ, 70, 1300 (1976). [R.S. Gekht, V.A. Ignatchenko, Yu.L. Ralkher, M.I. Shliomis. JETP, 43 (4), 677, (1976).]
9. Ю.Л. Райхер, М.И. Шлиомис. ЖЭТФ, 67, 1060 (1974) [Yu.L. Ralkher, M.I. Shliomis. JETP, 40, 526 (1975).]
10. Райхер Ю.Л., Шлиомис М.И. К теории дисперсии магнитной восприимчивости мелких ферромагнитных частиц // ЖТЭФ. - 1974. - т.67. - с. 1060-1073.
11. Вендик И.Б., Вендик О.Г. Метаматериалы и их применение в технике сверхвысоких частот (Обзор) // ЖТФ, 2013, Т. 83, Вып. 1, С. 3–28.
12. Никитов С.А., Гуляев Ю.В., Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Пономарев Д.В. // ДАН, 2013, Т. 448, №1, С. 35–37.

13. Усанов Д.А., Мерданов М.К., Скрипаль А.В., Пономарев Д.В. СВЧ фотонные кристаллы. Новые сферы применения. // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика, 2015, Т. 15, Вып. 1, С. 57-73.

14. Постельга А.Э., Скрипаль Ал.В., Игонин С.В., Карева А.А. Управляемый магнитным полем фотонный кристалл СВЧ-диапазона // Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами: Сборник статей седьмой Всероссийской научной школы-семинара 2020, Вып. 7, С. 71-74.

15. Постельга А.Э., Игонин С.В., Агапова Ю.А. Анизотропия коэффициента отражения СВЧ излучения от композита эпоксидная смола — магнитная жидкость — углеродные нанотрубки // Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами: Сборник статей одиннадцатой Всероссийской научной школы-семинара. 2024. С. 174-176.