

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

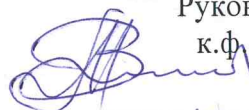
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Радиофизический факультет

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ В ГЭК

Руководитель ООП

к.ф.-м.н., доцент



В.А. Мещеряков

«19» января 2022 г.

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИОМАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ОКСИДНЫХ
ФЕРРИМАГНЕТИКОВ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ**

по основной образовательной программе подготовки специалиста
по специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы»

Беломытцев Игорь Олегович

Руководитель ВКР

канд. физ.-мат. наук, доцент



Г.Е. Кулешов

«18» января 2022 г.

Автор работы

студент группы № 768



И.О. Беломытцев

Томск-2022

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Радиофизический факультет

УТВЕРЖДАЮ
Руководитель ООП

к.ф.-м.н., доцент

В.А. Мещеряков

« 25 » декабря 2021 г.

ЗАДАНИЕ

на подготовку ВКР специалиста

студенту Беломытцеву Игорю Олеговичу группы №768

1. Тема ВКР: Исследование радиоматериалов на основе оксидных ферромагнетиков в широком диапазоне частот.

2. Срок сдачи студентом выполненной ВКР:

а) на кафедре 19.01.2022,

б) в ГЭК 01.02.2022.

3. Краткое содержание работы:

Новые радиоматериалы, эффективно взаимодействующие с излучением, востребованы в настоящее время. Область их применения определяется достоверной информацией о величинах магнитной и диэлектрической проницаемости на рабочей частоте. В связи с этим перед данной работой поставлена задача освоения методик измерения электромагнитных параметров композиционных радиоматериалов на основе оксидных ферромагнетиков и исследование их электромагнитных характеристик в широком диапазоне частот на различных измерительных установках.

4. Календарный график выполнения задания:

а) оформление литературного обзора	10.01.2022–13.01.2022
б) оформление материалов по изготовлению образцов и измерениям электромагнитных характеристик	13.01.2022–17.01.2022
в) оформление результатов и выводов по работе	17.01.2022–19.01.2022
г) техническое оформление ВКР в соответствии с требованиями	19.02.2022–21.02.2022

5. Дата выдачи задания « 25 » декабря 2021 г.

Руководитель НИР – кандидат физ.-
мат. наук, доцент кафедры
радиоэлектроники

Кулешов Кулешов Г.Е.

Задание принял к исполнению

Беломытцев Беломытцев И.О.

АННОТАЦИЯ

Отчет 89 с., 66 рис., 28 источников.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ОБРАЗЦЫ, КОМПОЗИЦИОННЫЕ РАДИОМАТЕРИАЛЫ, ФЕРРИМАГНЕТИКИ, ГЕКСАФЕРРИТЫ, ФЕРРИТЫ ШПИНЕЛИ, КОАКСИАЛЬНАЯ ЯЧЕЙКА, СПЛОШНЫЕ ФЕРРИТЫ, ЕСТЕСТВЕННЫЙ ФЕРРОМАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС

Объектом исследований являются новые радиоматериалы, эффективно взаимодействующие с излучением, и востребованные в настоящее время. Область их применения определяется достоверной информацией о величинах магнитной и диэлектрической проницаемости на рабочей частоте. В связи с этим перед данной работой поставлена задача освоения методик изготовления композиционных радиоматериалов на основе оксидных ферримагнетиков и исследование их электромагнитных характеристик в широком диапазоне частот на различных измерительных установках.

В результате работы:

- а) Проведен аналитический обзор литературных источников по тематике композиционных радиоматериалов на основе оксидных ферримагнетиков.
- б) Изготовлены экспериментальные образцы.
- в) Измерены электромагнитные характеристики образцов.
- г) Проведено моделирование электромагнитного отклика от материала в свободном пространстве и на металле исследованных образцов.
- д) Сделаны выводы по результатам, полученным в ходе проведенных исследований.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
1 Общие сведения о ферритмагнетиках	5
1.2 Перовскиты (ортоферриты)	7
1.3 Феррит-гранат	8
1.4 Гексагональные ферриты	8
1.5 Технология изготовления ферритов	9
1.6 Электромагнитные характеристики радиоматериалов	10
1.7 Применение ферритов	38
2 Экспериментальная часть	40
2.1 Методика изготовления образцов	41
2.2 Измерительное оборудование	44
2.3 Результаты измерений	47
2.4 Выводы о проделанной работе	78
3 Безопасность труда	80
3.1 Микроклимат рабочего места	81
3.2 Уровень шума на рабочем месте	82
3.3 Количественные характеристики освещения	83
3.4 Электробезопасность	84
Заключение	86
Список использованных источников и литературы	87

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день заметно ускорение темпов развития современного радиоэлектронного оборудования, частотная область работы которого приходится на СВЧ диапазон излучения. При этом возникают проблемы электромагнитной безопасности и электромагнитной совместимости. Также, электромагнитное излучение оказывает негативное воздействие на биологические объекты. Поэтому имеется необходимость поиска новых радиоматериалов, позволяющих снизить отрицательное воздействие сверхвысокочастотного излучения. Перспективными в данном направлении являются композиционные материалы. При правильном подборе составляющих композита они позволяют добиться требуемых электромагнитных свойств (высоких значений коэффициента поглощения и малого коэффициента отражения), получить низкий вес и высокую прочность материала. В качестве активной фазы композитов СВЧ диапазона хорошо зарекомендовали себя оксидные ферритмагнетики.

Ферриты можно использовать в качестве материалов, поглощающих микроволновое излучение вплоть до частоты в 100 ГГц. Это достигается благодаря присутствию ферритам магнитным свойствам, таким как большая намагниченность насыщения, большая магнитокристаллическая анизотропия и магнитная проницаемость. Эти радиоматериалы представляют собой микроволновые поглотители, которые могут быть использованы для уменьшения ЭМИ и обеспечения электромагнитной совместимости [1].

Целью работы является разработка и исследование композиционных радиоматериалов на основе оксидных ферритмагнетиков в широком диапазоне частот.

Для достижения поставленной цели были поставлены задачи:

- а) Проведение обзора литературных источников и анализ публикационной активности по тематике работы.
- б) Изготовление экспериментальных образцов.
- в) Освоение методики измерения электромагнитных характеристик радиоматериалов.
- г) Измерение электромагнитных характеристик образцов.
- д) Анализ полученных результатов и оформление научно-исследовательской работы.

1 Общие сведения о ферримагнетиках

Ферримагнетики относятся к сильномагнитным материалам и имеют доменную структуру, которая состоит из двух или более подрешеток, связанных антипараллельно. Так как подрешетки образуются атомами различных химических элементов или разным их количеством, они имеют отличающиеся по величине магнитные моменты, которые направлены антипараллельно. В итоге появляется отличная от нуля разность магнитных моментов, которая приводит к спонтанному намагничиванию кристалла. Свое название эти материалы приобрели от ферритов – первых некомпенсированных антиферромагнетиков [2]. У них в свою очередь доменная структура образуется при температурах, находящихся ниже точки Кюри. Ферритам обладают всеми магнитными характеристиками, присущими ферромагнетикам. Они имеют высокое значение удельного сопротивления, меньшую величину индукции насыщения и значительную магнитную проницаемость и обладают стабильностью своих магнитных характеристик в широком диапазоне частот [2, 3].

Ферриты являются не скомпенсированными ферримагнетиками, у которых элементарные ячейки намагниченности во внешнем магнитном поле имеют антипараллельную ориентацию. Ферриты образованы элементами с незаполненными $3d$ -или $4f$ -электронными оболочками, атомы или ионы которых обладают магнитными моментами [1].

Как твердое тело, они представляют собой магнитную керамику. Различают магнито-мягкие ферриты с узкой петлей гистерезиса и магнито-жесткие ферриты с широкой петлей гистерезиса. Магнито-мягкие ферриты широко используются в различных катушках индуктивностей, дросселей, трансформаторов, магнитных антеннах и при изготовлении высокочастотных магнитопроводов. Магнито-жесткие ферриты применяются в качестве постоянных магнитов в различных приборах и устройствах [4], а также в ячейках памяти.

Основные типы ферритов: ферриты-шпинели, ферриты-гранаты, ортоферриты и гексаферриты.

Анализируя количество опубликованных в разные года статей, посвященных изучению ферритов (рисунок 1), можно сделать вывод, что с каждым годом популярность данной тематики стремительно возрастает, следовательно, дальнейшее исследование и применение ферритов имеет довольно большие перспективы.

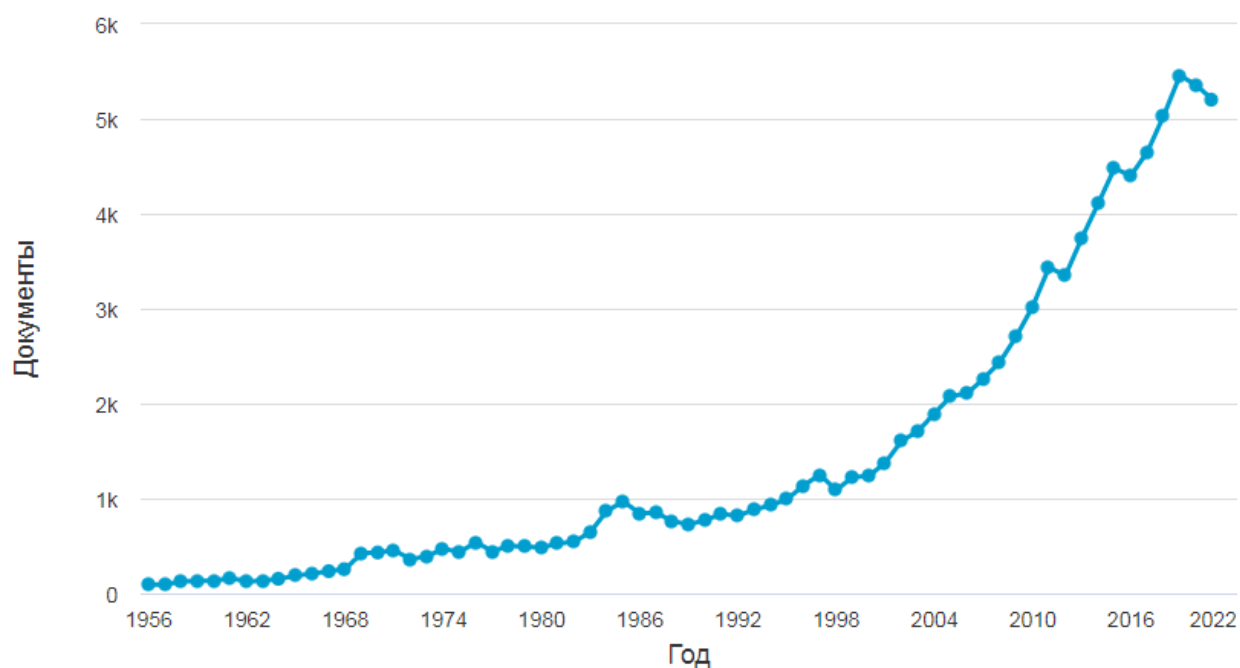


Рисунок 1 – Публикация статей, посвященных ферритам в разные годы [5]

Анализируя количество опубликованных разными странами статей, посвященных изучению ферритов (рисунок 2), можно сделать вывод, что наиболее заинтересованными в исследовании ферритов странами являются Китай, США и Индия. Россия в этом рейтинге занимает 5 место и на ее долю приходится примерно 4,5 тысячи статей.

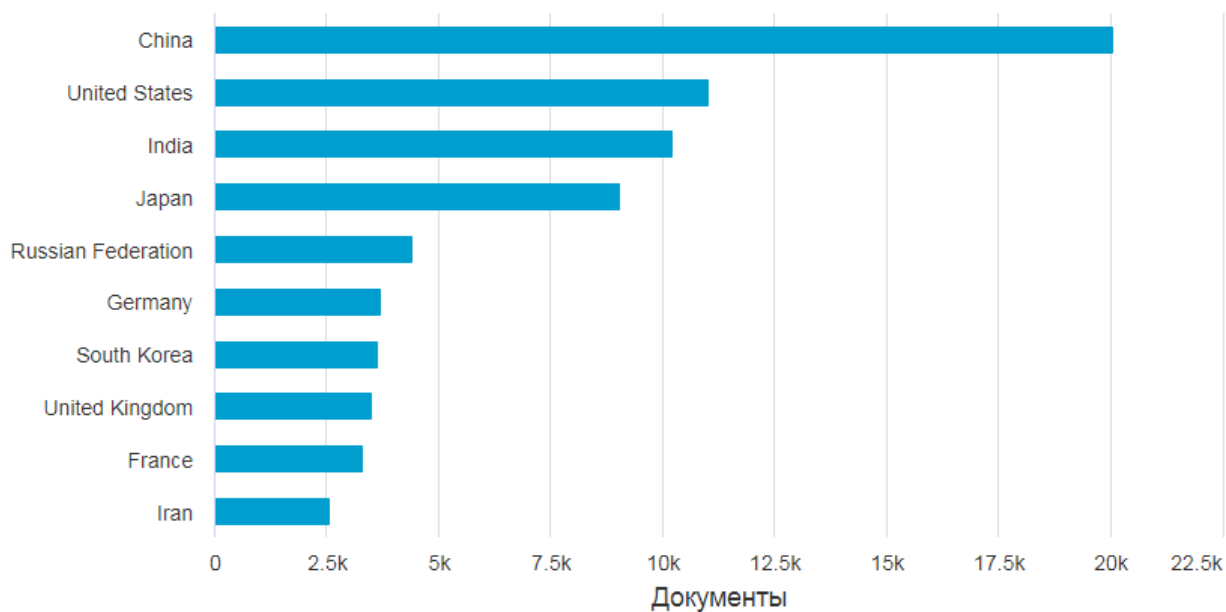


Рисунок 2 – Рейтинг стран, опубликовавших статьи, посвященные ферритам [5]

1.1 Ферриты-шпинели

Ферриты типа шпинели имеют структуру природного минерала шпинели и описываются общей химической формулой $(Me_2O_k)_{m/2}(Fe_2O_3)_n$ где кроме ионов O и Fe присутствуют еще ионы металлов Fe, Co, Ni, Mn, Zn, Cu, Cd, Mg. Кристаллическую структуру шпинели можно рассматривать исходя из теории плотных упаковок. В плотных упаковках можно выделить пустоты двух типов: тетраэдрические, образующиеся четырьмя шарами, расположенными в вершинах тетраэдра (рисунок 3, а), и октаэдрические, которые образованы пятью шарами (рисунок 3, б). При плотной упаковке анионов O^{2-} в элементарной ячейке шпинели образуется 64 тетраэдрических и 32 октаэдрических пустоты. В них и расположены катионы Me^{2+} и Fe^{3+} , занимающие 8 тетраэдрических и 16 октаэдрических пустот.

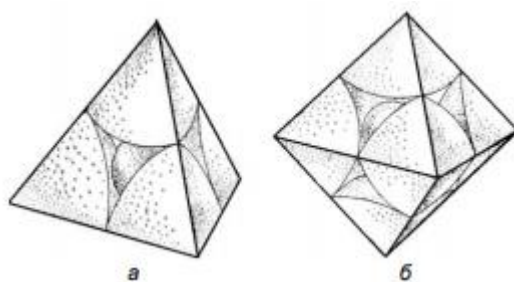


Рисунок 3 - Тетраэдрические (а) и октаэдрические (б) пустоты [6]

Известно, что экспериментальные значения параметров решеток шпинели находятся в пределах 0,8–0,9 нм [6].

1.2 Перовскиты (ортоферриты)

Ортоферритами принято называть группу ферритов, имеющих орторомбическую кристаллическую структуру. Их образуют редкоземельные элементы с общей химической формулой $RFeO_3$, где R – ионы редкоземельных элементов. Ортоферриты имеют структуру минерала-перовскита. Ортоферриты являются антиферромагнетиками и обладают слабым ферромагнетизмом. Только при достаточно низких температурах в ортоферритах упорядочиваются магнитные моменты редкоземельных ионов, и они становятся ферримагнетиками.

В структуре перовскита (рисунок 4) кристаллизуются магнитные кристаллы с

общей формулой ABX_3 , где A и X – ионы, образующие кубическую плотную упаковку, а B – ионы, которые находятся в октаэдрических междоузлиях кислородной решетки. На одну элементарную ячейку приходится одна молекула [5].

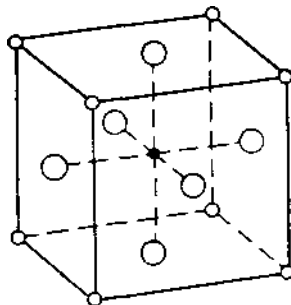


Рисунок 4 - Структура перовскита ABX_3 [5]

1.3 Феррит-гранат

Феррит-гранат описывается общей химической формулой $R_3Fe_5O_{12}$ и представляет собой окислы с кубической структурой. Ионы O^{2-} образуют плотноупакованную структуру, в пустотах между ионами кислорода размещаются редкоземельные ионы и ионы железа либо элементы, которые частично их замещают. В структуре данного феррита наблюдаются следующие виды пустот: додекаэдрические, октаэдрические и тетраэдрические. В первом случае катион металла окружен восемью ионами кислорода, во втором – шестью ионами кислорода, а в третьем – четырьмя ионами кислорода. Ионы железа, которые находятся в октаэдрических позициях, формируют октаэдрическую магнитную подрешетку, а ионы железа, которые расположены в тетраэдрических позициях, формируют тетраэдрическую магнитную подрешетку. Между этими ионами возникает сильное обменное взаимодействие, которое приводит к антипараллельному упорядочению магнитных моментов, и потому данный тип феррита относится к классу ферритмагнетиков. Феррит-гранат характеризуется высокой прозрачностью в ближней ИК-области спектра, а уровень поглощения в них определяется дефектами кристаллической решетки [8].

1.4 Гексагональные ферриты

Ферриты являются одной из самых сложных областей для теоретического описания, но наиболее интересными для исследований и практического применения

в высокочастотной радиоаппаратуре, это утверждение особенно верно, когда речь идет об особом типе ферритов, которые имеют гексагональную кристаллографическую структуру (гексагональные ферриты или гексаферриты). Гексагональные ферриты являются удобным объектом для исследования различных эффектов, связанных с их «сендвичевой» структурой, которая представляющую совокупность кислородных слоев двух типов: шпинельного и гексагонального, содержащего ионы Me^{2+} . Эти ферриты интересны тем, что благодаря значительной анизотропии их свойств, можно проследить за процессами упорядочения катионов и дефектов, и связанных с ними изменениями магнитных параметров, и тем, что они могут применяться на более высоких частотах СВЧ диапазона [9]. В таблице 1 приведены основные типы гексагональных ферритов.

Таблица 1 – Основные типы гексагональных ферритов [4]

Тип гексагонального феррита	Общая химическая формула
Феррит М-типа	$BaFe_{12}O_{19}$
Феррит Z-типа	$Ba_3Me_2Fe_{24}O_{41}$
Феррит Y-типа	$Ba_2Me_2Fe_{12}O_{22}$
Феррит W-типа	$BaMe_2Fe_{16}O_{27}$
Феррит X-типа	$Ba_2Me_2Fe_{28}O_{46}$
Феррит U-типа	$Ba_4Me_2Fe_{36}O_{60}$

Данная работа как раз посвящена исследованию электромагнитных характеристик композиционных радиоматериалов на основе гексагонального феррита W-типа.

1.5 Технология изготовления ферритов

При изготовлении ферритового порошка в качестве исходного сырья используются окислы металлов. Чтобы получить феррит с необходимыми магнитными свойствами, необходимо предъявлять жесткие требования к исходному материалу, то есть следить за его химической чистотой и химической активностью. Изделие измельчается в порошок для получения более тонкого материала, обычно в высокоэнергетической планетарной шаровой мельнице, а затем подвергается обжигу для

ферритизации материала. Далее продукт снова измельчается, а затем отправляется на формовку изделий, но сперва его пластифицируют с помощью раствора поливинилового спирта. Затем происходит формирование изделий методом прессования или методом горячего литья. Полученные изделия спекают при температуре 1100-1400 °С в газовой среде. В процессе спекания завершаются химические реакции в твердой фазе, устраняется пористость, фиксируется форма изделий [10].

Так же можно выделить три самых основных схемы изготовления ферритов:

- а) Технологическая схема получения ферритов на основе механического смешивания окислов и солей.
- б) Технологическая схема, основанная на термическом разложении солей.
- в) Технологическая схема, основанная на совместном осаждении углекислых солей.

1.6 Электромагнитные характеристики радиоматериалов

По электрическим свойствам оксидные ферритмагнетики определяются как диэлектрики, а по магнитным свойствам определяются как магнитные вещества. По диапазону рабочих частот ферритмагнетики определяются как высокочастотные материалы.

Параметры, по которым можно легко оценить, подходит ли радиоматериал для той или иной задачи (является поглотителем или отражателем), это коэффициент прохождения – « T », а коэффициент отражения – « R », и коэффициент поглощения – « A ». Значения фазы и модуля коэффициента отражения и коэффициента прохождения в свою очередь зависимы от толщины слоя магнитного образца и от значений магнитной ($\mu(\omega)=\mu'(\omega)-i\mu''(\omega)$) и диэлектрической ($\varepsilon(\omega)=\varepsilon'(\omega)-i\varepsilon''(\omega)$) проницаемостей, где ε' , μ' – действительные, ε'' , μ'' – мнимые части этих величин, а i – мнимая единица.

Для плоской электромагнитной волны, падающей на плоский слой магнито-диэлектрика под прямым углом, выражения для коэффициентов отражения и прохождения могут быть записаны в виде:

$$R = \frac{\rho(1-e^{-2i\gamma d})}{1-\rho^2 e^{-2i\gamma d}}; \quad T = \frac{\{1-\rho^2\}e^{-i\gamma d}}{1-\rho^2 e^{-2i\gamma d}},$$

где $\rho = (Z - 1) / (Z + 1)$ – коэффициент отражения от магнитного диэлектрика, $Z = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}$ – волновое сопротивление, $\gamma = k_0 \sqrt{\varepsilon \mu}$ – постоянная распространения волны в магнитном диэлектрике, $k_0 = \frac{\omega}{c}$ – волновое число, а $\omega = 2\pi f$ – круговая частота электромагнитного процесса [11].

Следует понимать, что на электромагнитные свойства образцов так же влияет температура, влажность, давление и частота. У большинства диэлектрических материалов с ростом частоты тангенс угла потерь и диэлектрическая проницаемость могут либо увеличиваться, либо уменьшаться. С повышением температуры, увеличивается значение диэлектрических потерь, а пробивная прочность уменьшается.

При изучении электромагнитных характеристик образцов, в основном, устанавливается зависимость коэффициентов передачи и отражения от химического состава образца, размеров частиц, ширины исследуемого образца, а также от частоты электромагнитных волн, проходящих через коаксиальную ячейку, в котором находится исследуемый образец.

Например, в работе [12] исследуется влияние размеров частиц образца на электромагнитные свойства, а именно, на магнитную и диэлектрическую проницаемости. В данной статье сравниваются характеристики образцов на основе гексагонального феррита W-типа $\text{BaCoZnFe}_{16}\text{O}_{27}$, состоящие из микрочастиц и наночастиц. Бариевые ферриты были синтезированы с использованием керамической техники. Наночастицы были получены с помощью высокоэнергетического шарового помола с различной продолжительностью, с последующим обжигом при температуре 600 °C в течение 2 ч для удаления дефектов кристаллов, образованных из-за шарового фрезерования. Микрометрические частицы были приготовлены из измельченных порошков, пропущенные через сита разных размеров. Количество образцов и соответствующий метод приготовления приведены в таблице 2. *M1* и *M2* относятся к образцам с микрочастицами, *N1-N4* относятся к образцам с наночастицами.

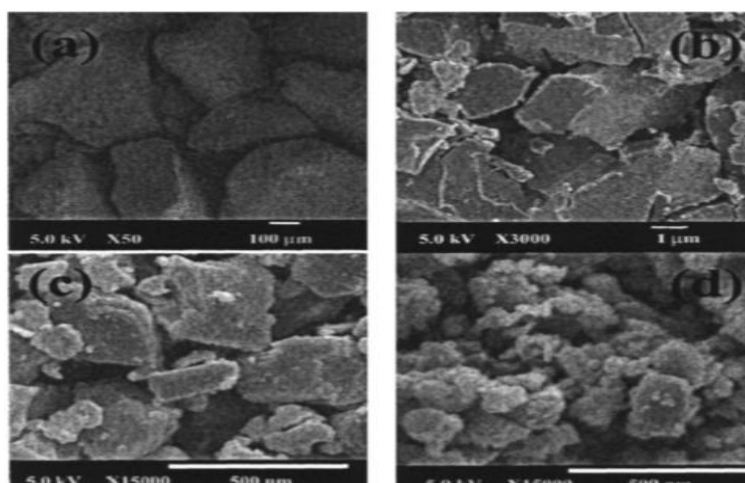
Таблица 2 – Основные типы гексагональных ферритов [4]

No.	Preparation	l (nm)	t_c (nm)	Size ^a $\langle d \rangle$ (nm)	Size ^b $\langle d \rangle$
M1					350 μm
M2					3 μm
N1	Ball milling for 4 h	111	38	78	320 nm
N2	Ball milling for 6 h	63	30	49	190 nm
N3	Ball milling for 8 h	52	27	41	130 nm
N4	Ball milling for 16 h	30	18	25	80 nm

^aObtained via XRD for grain size.

^bObtained via SEM for particle size.

Порошки $\text{BaCoZnFe}_{16}\text{O}_{27}$ смешивали с эпоксидной смолой. Объемная концентрация порошков составляет 50 % во всех композитах. Изготовленные образцы представляют собой плоские шайбы для измерения в коаксиальной ячейке. Размеры образцов: внешний диаметр $d_{\text{внеш}}=6,9$ мм, внутренний диаметр $d_{\text{внут}}=3$ мм, толщина $h=2$ мм. Рентгеновские дифракционные измерения были выполнены с помощью дифрактометра *Philips*. Так же были приведены результаты наблюдения микрочастиц и наночастиц под электронным микроскопом (рисунок 5).



a) M1, b) M2, c) N1, d) N4.

Рисунок 5 – Микро- и наночастицы под электронным микроскопом [12]

Диэлектрическая проницаемость немного зависит от частоты. Например, составляет около 7,6 при 0,5 ГГц и 7,1 при 16,5 ГГц для образца *M1*. По мере уменьшения размера частиц реальная диэлектрическая проницаемость на 0,5 ГГц уменьшается с 7,6 до 7,2 для образцов *M1* и *M2* с микрочастицами, и примерно до 6,7 для образцов *N1* и *N4* с наночастицами, в то время как соответствующая мнимая проницаемость уменьшается с 0,4 до 0,2, как показано на рисунке 6.

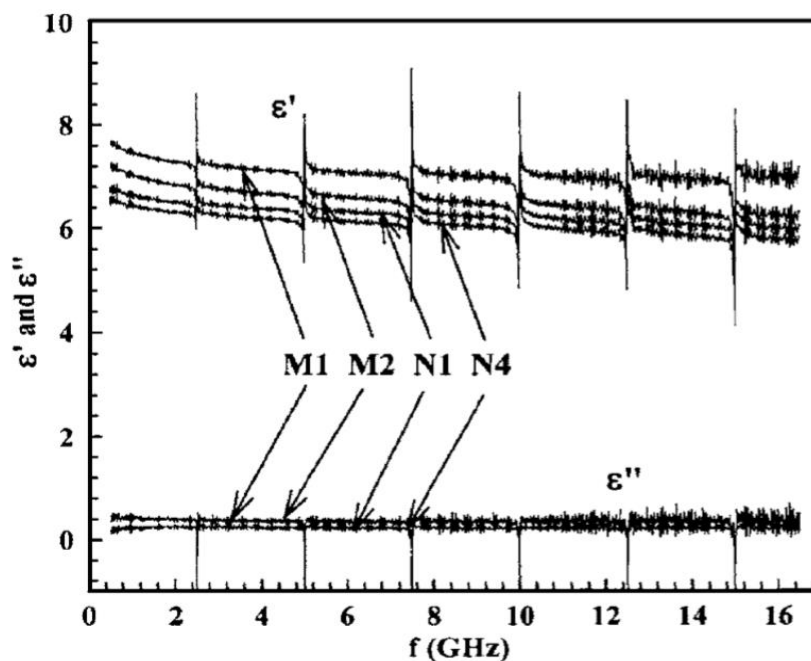


Рисунок 6 – Спектры диэлектрической проницаемости от 0,5 до 16,5 ГГц для композитов, заполненных микрочастицами *M1* и *M2* и наночастицами *N1* и *N4* [12]

Спектры магнитной проницаемости приведены на рисунке 7. Квазистатическая проницаемость μ' – реальная проницаемость при 0,05 ГГц (вдали от резонансной частоты), f_R – резонансная частота, а μ''_{max} – мнимая проницаемость на резонансной частоте. Спектры комплексной проницаемости имеют три значительно отличающиеся характеристики для образцов с микрочастицами и наночастицами.

а) Для микрочастиц спектры проницаемости имеют два резонансных пика около 1 и 4–5 ГГц, как показано пунктирной и сплошной стрелками, соответственно. Для наночастиц спектры имеют только один резонансный пик на 6–7 ГГц.

б) Для образцов $M1$ и $M2$ с микрочастицами, при частоте 1–2 ГГц магнитная проницаемость μ' около 4,0 и 3,0 соответственно, что значительно больше проницаемости для образцов с наночастицами. Так же образцы с микрочастицами имеют больший максимум μ'' чем образцы с наночастицами: $\mu''_{max}=1,6$ и 1,2 для образцов $M1$ и $M2$, соответственно, по сравнению с $\mu''_{max}=0,6-0,8$ для образцов с наночастицами.

в) Резонансная частота f_R смещается выше, так как размер частицы уменьшается от микрометра до нанометра.

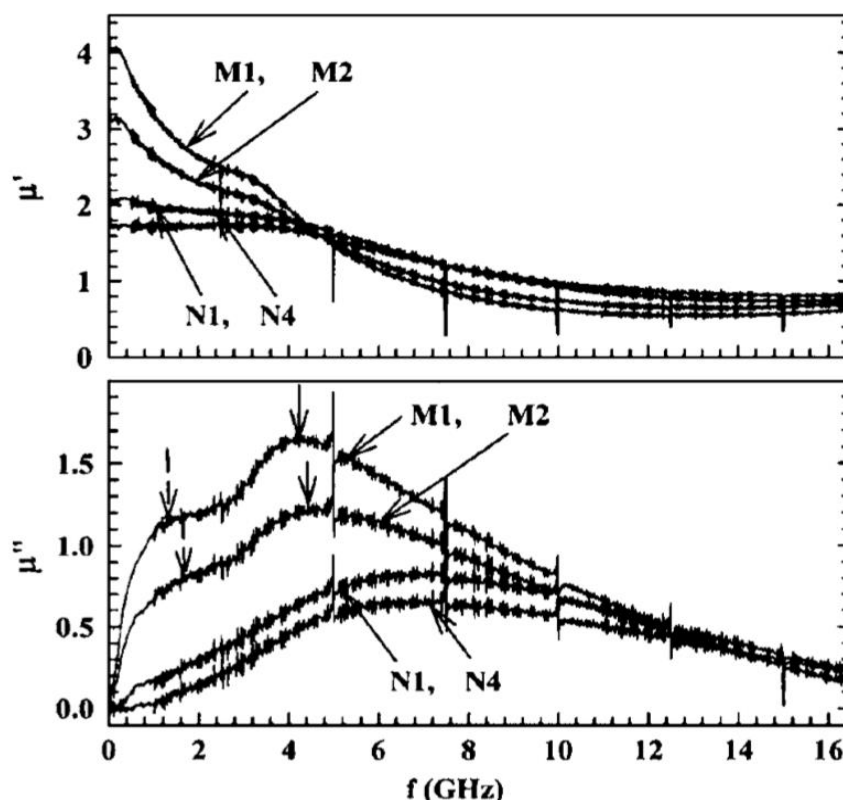


Рисунок 7 – Спектры магнитной проницаемости от 0,05 до 16,5 ГГц для композитов, заполненных микрочастицами $M1$ и $M2$ и наночастицами $N1$ и $N4$ [12]

Результаты показывают, что образцы с микрочастицами обладают гораздо лучшими электромагнитными свойствами, чем образцы с наночастицами для использования в качестве композитов с низкой отражательной способностью и широкой полосой пропускания на микроволновой частоте.

В статье [13] исследовались композиционные образцы на основе гексаферрита с химической формулой $\text{Ba}_{(1-2x)}\text{La}_x\text{Na}_x\text{Fe}_{10}\text{Co}_{0,5}\text{TiMn}_{0,5}\text{O}_{19}$, где $x=0,00-0,25$. Гексаферриты бария $\text{Ba}_{(1-2x)}\text{La}_x\text{Na}_x\text{Fe}_{10}\text{Co}_{0,5}\text{TiMn}_{0,5}\text{O}_{19}$ были синтезированы с использованием обычной методики твердофазных реакций. Спекание гексаферритов проводилось в течение 8 ч при 1250 °С. Рентгеноструктурный анализ показал, что образцы $\text{Ba}_{(1-2x)}\text{La}_x\text{Na}_x\text{Fe}_{10}\text{Co}_{0,5}\text{TiMn}_{0,5}\text{O}_{19}$ имеют магнитоплюмбитную структуру, Размер зерна составил порядка 0,817–1,105 мкм.

Магнитные свойства образцов были измерены с использованием модели *VSM Microsense EZ9*. Спектры диэлектрической проницаемости (рисунок 8) имеют колебательный характер в наблюдаемом диапазоне частот. Диэлектрическая проницаемость для всех образцов лежит в диапазоне 3,37–10,99 и показывает уменьшение с увеличением частоты для всех образцов, но не имеет четких изменений при замене количества La и Na. Колебательное поведение обусловлено положительными и отрицательными ионами разной валентности (в сложной гексагональной структуре ферритов), которые разделены различными длинами связей. Различные силы связи производят электрические моменты различной интенсивности, таким образом, производя дипольную поляризацию. Кроме того, структура феррита состоит из проводящих зерен, разделенных непроводящими границами, которые создают неоднородность, тем самым порождая межфазные поляризации. Оба явления, а именно дипольная и межфазная поляризации вносят вклад в диэлектрическую проницаемость. В гексаферритах ϵ зависит от различных ионов, присутствующих в его кристаллической структуре, так как они демонстрируют различное релаксационное поведение.

Значения ϵ'' лежат в диапазоне 0,24–7,03, а максимальное значение для образца $x=0,15$ составляет 7,03, для образца $x=0,10$ составляет 6,96 и для образца $x=0,05$ составляет 5,85 на частотах 20,38 ГГц, 21,91 ГГц и 21,74 ГГц соответственно. Электрон прыгает между различными ионами феррита, внося влияние в механизм проводимости, который, в свою очередь, вносит вклад в значения ϵ' и ϵ'' . Кроме того, когда электрон прыгает, частота становится равной частоте приложенного микроволнового сигнала, затем возникает явление диэлектрического резонанса, что приводит к большим диэлектрическим потерям. Следовательно, различные механизмы релакса-

ции образовавшихся диполей, прыжковые и релаксационные характеристики в совокупности могут стать предполагаемой причиной нелинейного поведения диэлектрических свойств (ϵ' и ϵ'').

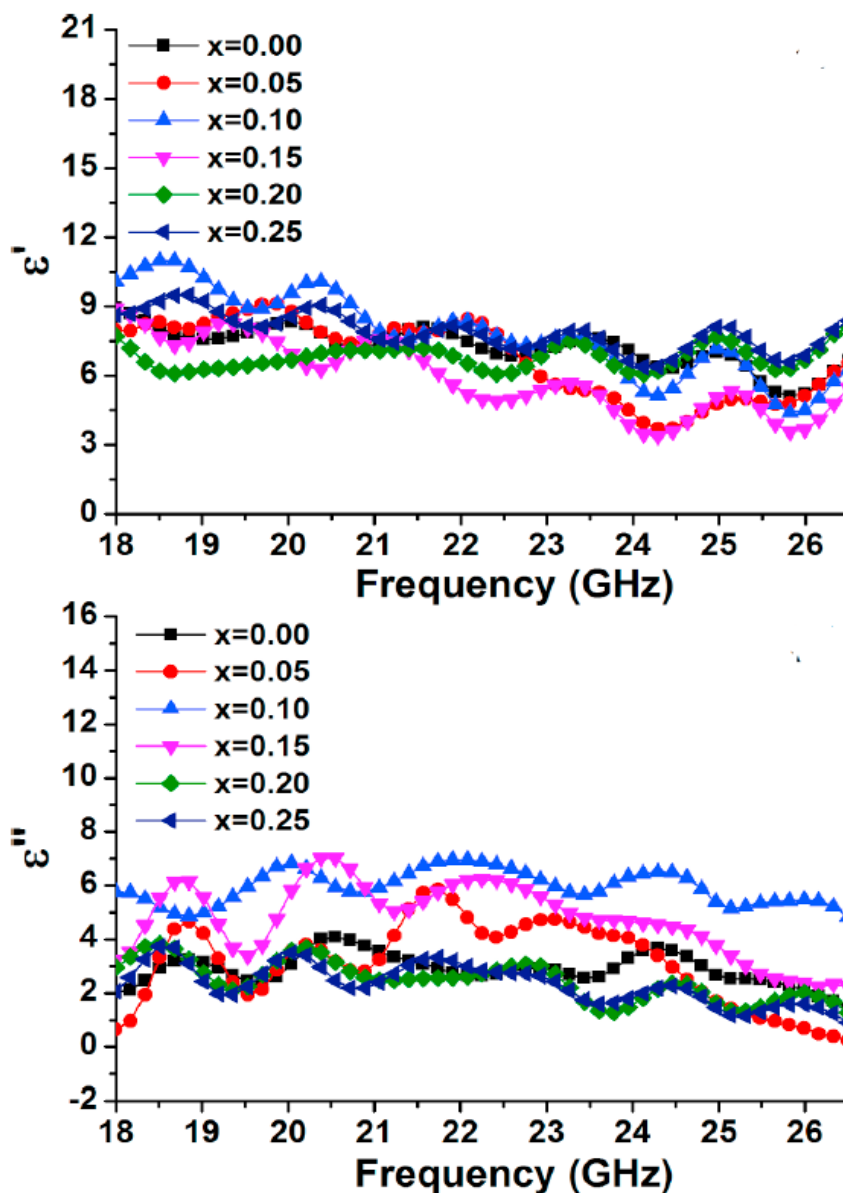


Рисунок 8 – Спектры диэлектрической проницаемости [13]

Комплексная магнитная проницаемость (μ' и μ'') представлена на рисунке 9. Из спектров проницаемости ясно, что существует колебательное и нелинейное поведения. С заменой лантана и натрия, направление вектора намагниченности меняется, а магнитные свойства образцов показывают колебательное или зигзагообраз-

ное поведение после взаимодействия с сигналом. Изменение проницаемости при легировании объясняется ограниченной скоростью вращения и движения доменной стенки в гексаферритах. Значение μ' лежит в диапазоне 0,66–1,48 за исключением образца $x=0,15$, который имеет большой пик (1,77). Значения μ'' колеблются между 0,01 и 0,73 и также наблюдаются резонансные пики. В представленных образцах пики в спектре магнитных проницаемостей для всех составов наблюдаются вблизи конца исследуемой полосы частот. Наблюдаемые пики в спектрах диэлектрических и магнитных проницаемостей лежат в той же области частот, т.е. диэлектрический и магнитный резонанс существуют одновременно, что способствует увеличению СВЧ поглощения.

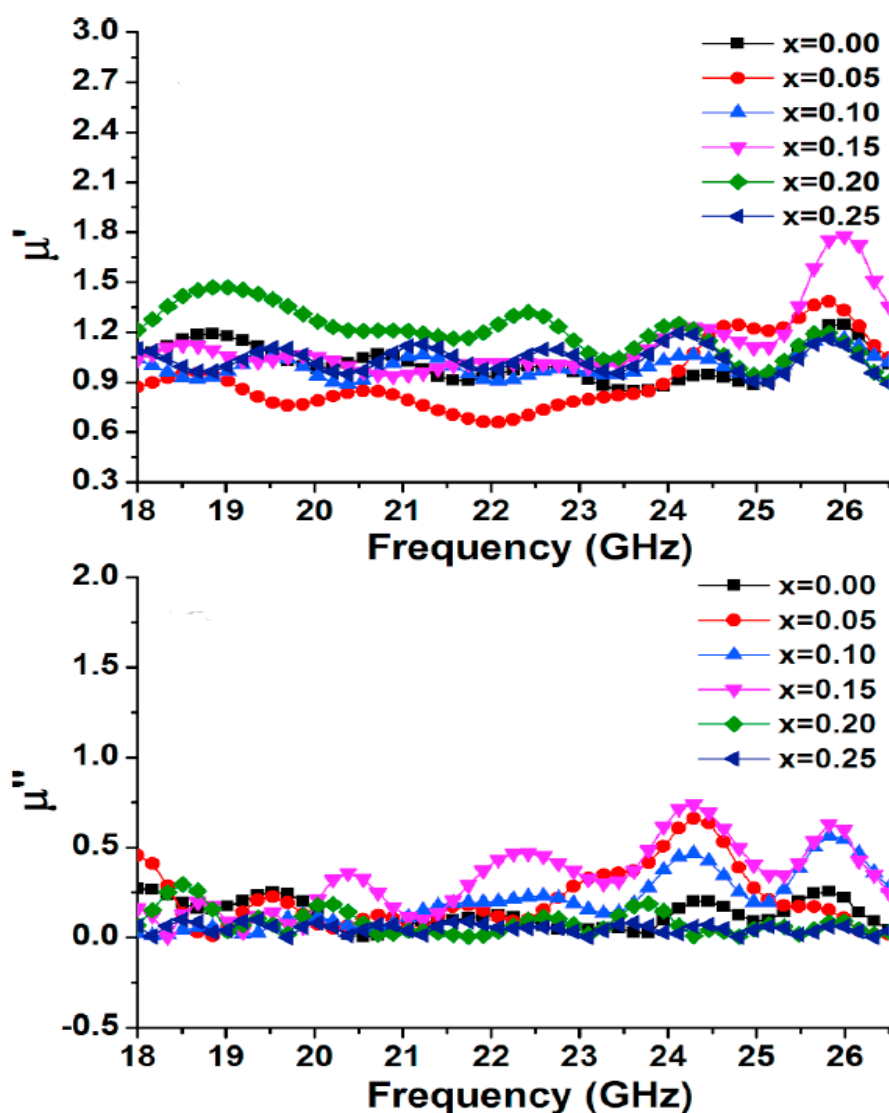


Рисунок 9 – Спектры магнитной проницаемости [13]

Все выше упомянутые образцы были изготовлены с различной шириной (1–4,2 мм), и были измерены их коэффициенты отражения (рисунок 10).

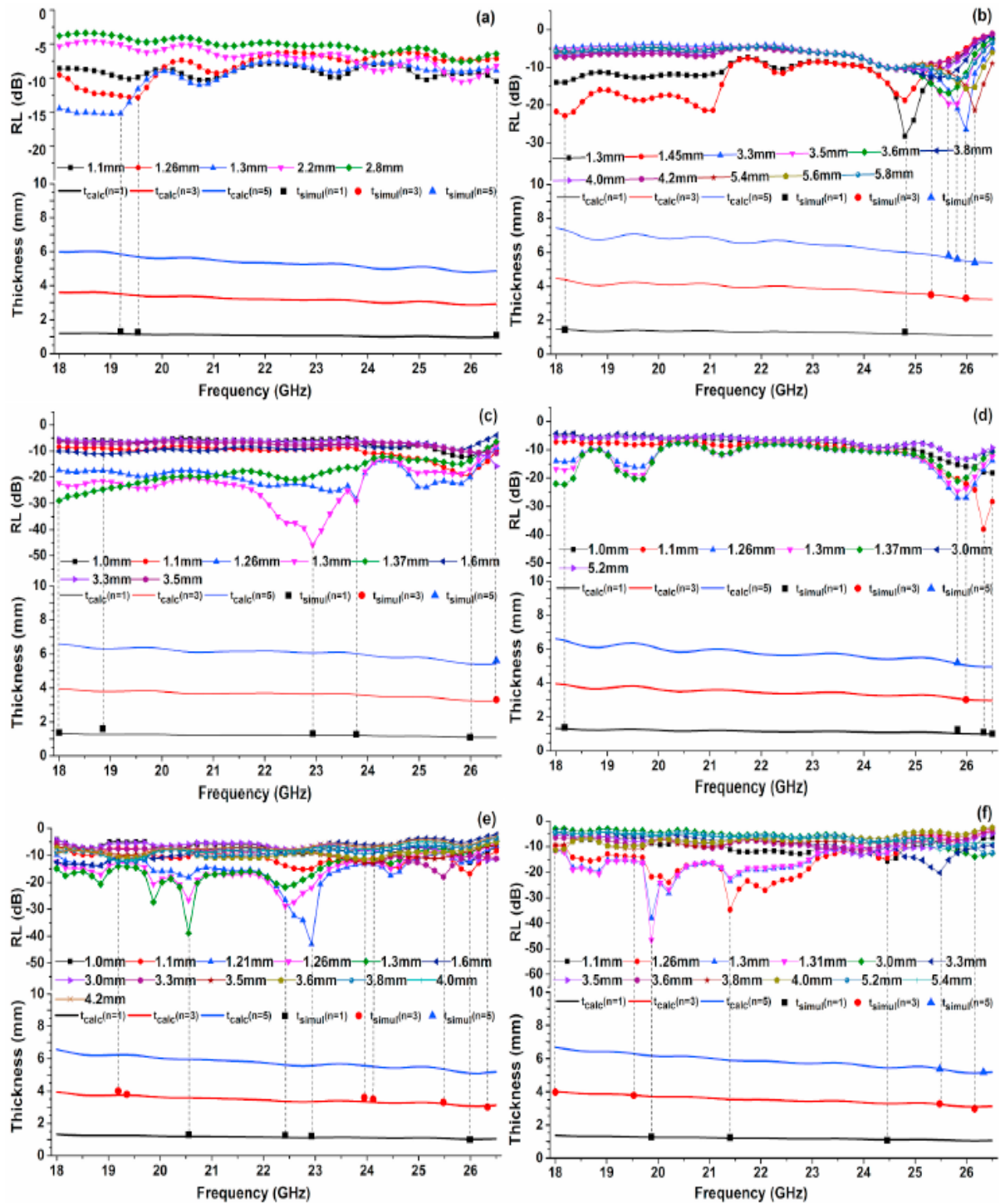


Рисунок 10 – Коэффициенты отражения образца $\text{Ba}_{(1-2x)}\text{La}_x\text{Na}_x\text{Fe}_{10}\text{Co}_{0.5}\text{TiMn}_{0.5}\text{O}_{19}$ с различными заменами, и различной толщиной [13]

Ниже приведена таблица значений потерь отражения и полосы пропускания для образца $Ba_{(1-2x)}La_xNa_xFe_{10}Co_{0.5}TiMn_{0.5}O_{19}$ с различными заменами, толщина которого составляет 1,3 мм.

Таблица 3 – Значения коэффициента отражения и полосы пропускания

Образец	RL (ДБ)	Ширина полосы частот, ГГц
$BaFe_{10}Co_{0.5}TiMn_{0.5}O_{19}$	-15,27	1,70
$Ba_{0.9}La_{0.05}Na_{0.05}Fe_{10}Co_{0.5}TiMn_{0.5}O_{19}$	-13,96	3,23
$Ba_{0.8}La_{0.10}Na_{0.10}Fe_{10}Co_{0.5}TiMn_{0.5}O_{19}$	-45,94	8,33
$Ba_{0.7}La_{0.15}Na_{0.15}Fe_{10}Co_{0.5}TiMn_{0.5}O_{19}$	-23,70	3,06
$Ba_{0.6}La_{0.20}Na_{0.20}Fe_{10}Co_{0.5}TiMn_{0.5}O_{19}$	-38,87	6,63
$Ba_{0.5}La_{0.25}Na_{0.25}Fe_{10}Co_{0.5}TiMn_{0.5}O_{19}$	-46,47	6,63

Видно, что композиционные материалы с $x=0,10$ и $x=0,25$ показали минимальные потери отражения, -45,94 дБ и -46,47 дБ соответственно, т.е. около 99 % поглощения СВЧ сигнала. Следовательно, эти образцы отлично подходят для защиты от электромагнитного излучения.

В статье [14] исследовалось влияние изменения содержания неодима в феррите шпинели с химической формулой $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Nd_xFe_{2-x}O_4$ ($x = 0.00, 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.20$) на его структуру, магнитные и микроволновые поглощающие свойства, так как повышение содержания неодима может привести к увеличению интенсивности поляризации, что способствует увеличению способности микроволнового поглощения.

На рисунке 11 показаны потери на отражение при серии толщин для ферритов $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$ (a) и $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Nd_{0.04}Fe_{1.96}O_4$ (b), а также 3D (c) и 2D (d) представления значений потерь при отражении и изменение потерь при отражении с толщиной образца для $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Nd_{0.04}Fe_{1.96}O_4$.

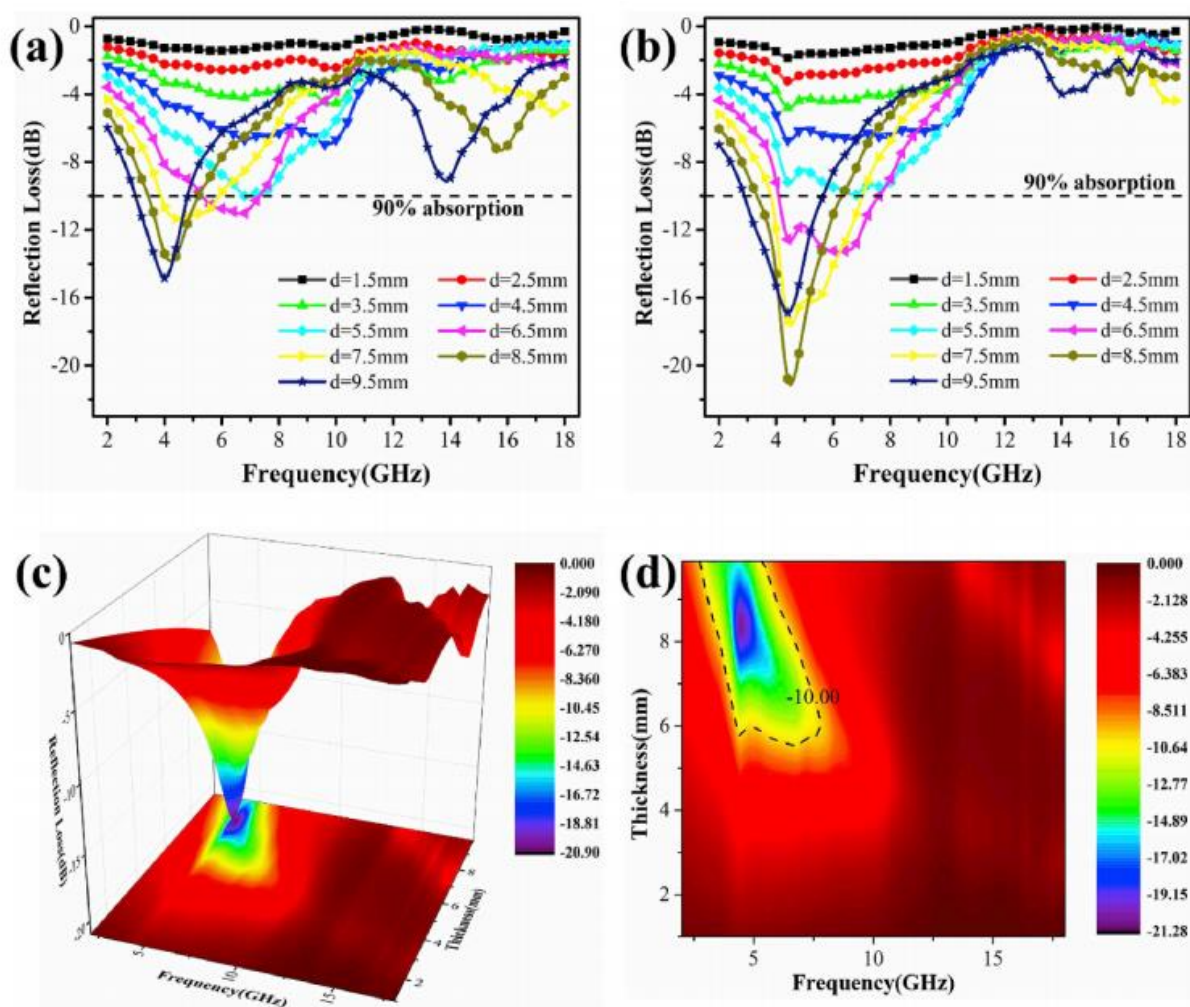


Рисунок 11 – Зависимость потери на отражения от толщины образца для $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ (a) и $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Nd}_{0.04}\text{Fe}_{1.96}\text{O}_4$ (b), трехмерное представление (c), двумерное представление (d) значений потерь на отражение для $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Nd}_{0.04}\text{Fe}_{1.96}\text{O}_4$ [14]

Расчет потерь на отражение в синтезированных образцах может быть выражен формулой:

$$R_L(\text{db}) = 20 \log \left| \frac{Z_{in}-1}{Z_{in}+1} \right|,$$

где Z_{in} - нормированный входной импеданс.

Как показано на рисунке 12 (a) и (b), показатели поглощения феррита без добавления Nd значительно ниже, чем у $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Nd}_{0.04}\text{Fe}_{1.96}\text{O}_4$. R_L (потери на отражение) феррита с добавлением Nd составляет –14,8 дБ на частоте 4 ГГц при толщине образца 9,5 мм, а R_L феррита с добавлением Nd составляет –20,8 дБ на частоте

4,4 ГГц при толщине 8,5 мм. Основные поглощающие области обоих образцов находятся в диапазоне низких частот 3–8 ГГц. Предположим, что потери на отражение в качестве эффективной поглощающей области равняются значению ниже -10 дБ (поглощение более 90%), эффективная ширина полосы поглощения первого 2,1 ГГц при толщине 9,5 мм, а второго - 3,2 ГГц при толщине 8,5 мм.

Потеря отражательной способности $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Nd}_{0.04}\text{Fe}_{1.96}\text{O}_4$ на частоте 2–18 ГГц в диапазоне толщин 1–10 мм показана на рисунке 12 (с) и (d) соответственно. Можно видеть, что R_L образца сильно варьируется в зависимости от частоты и толщины. Высокие потери отражения в диапазоне толщины 6–9 мм на низких частотах, главным образом, связаны с тем, что легирование Nd регулирует диэлектрическую проницаемость феррита и улучшает способность материала к диэлектрическим потерям. Между тем, это очень помогает достичь согласования импедансов. На рисунке 12 показано, что оптимальный диапазон толщины образцов составляет 8,5–9,5 мм, поэтому потери отражения при толщине 8,5 мм выбираются для формирования кривых R_L в зависимости от частоты каждого образца, как показано на рисунке 12.

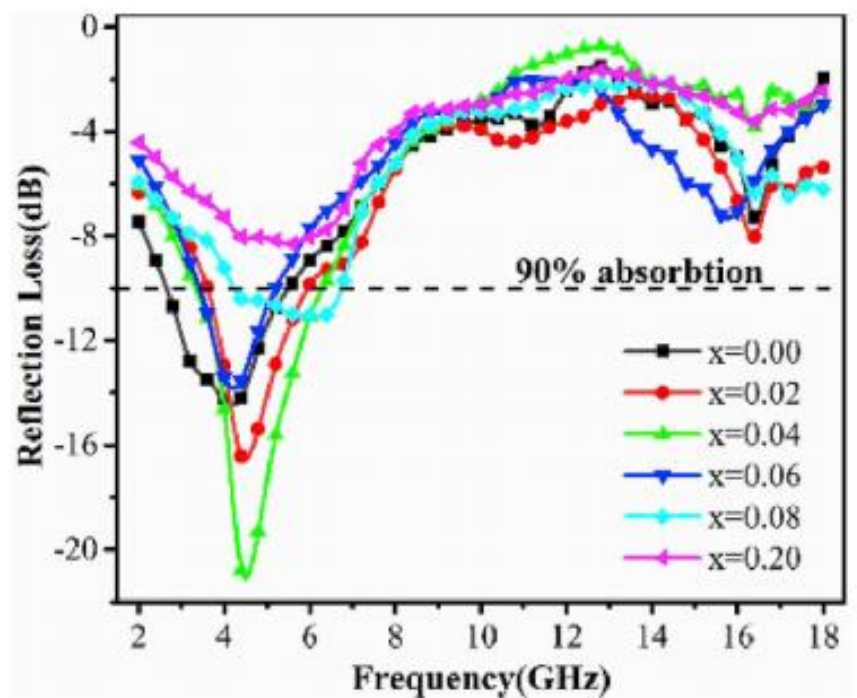


Рисунок 12 – Значения потерь на отражение при толщине образца 8,5 мм [14]

Результаты показывают, что свойства микроволнового поглощения феррита при $x = 0,04$ являются лучшими. Это связано с тем, что усиление способности диэлектрических потерь шпинельных ферритов легированием ионами Nd является доминирующим фактором, влияющим на способность микроволнового поглощения образцов при $x < 0,04$. В этом состоянии вторичная фаза Nd_2O_3 практически не появляется, и ослабляющий эффект добавления Nd на способность к магнитным потерям неочевиден. Напротив, когда $x > 0,04$, способность к магнитным потерям довольно быстро уменьшается, эффект усиления диэлектрических потерь замедляется, и способность образцов к микроволновому поглощению уменьшается.

Результаты измерений показывают, что содержание неодима играет важную роль в улучшении диэлектрических свойств и микроволновой поглощающей способности материалов, особенно на низких частотах. Легирование неодимом может увеличивать интенсивность поляризации материала, а также способствовать увеличению способности поглощения микроволн. При $x = 0,04$ оптимальный пик поглощения материала достигает $-20,8$ дБ при частоте $4,4$ ГГц при толщине образца $8,5$ мм.

Магнитно-мягкие ферриты Ni-Zn используются в различных электронных устройствах и электромагнитных устройствах, требующих высокой магнитной проницаемости, таких как индукторы и поглотители электромагнитных волн. В настоящее время интерес представляет получение ферритовых частиц Ni-Zn микро- и наноразмеров для уменьшения потерь энергии, связанных с объемными порошками. Феррит Mn-Zn шпинельного типа также является магнитомягким материалом, имеющим высокую проницаемость на частотах ниже 100 МГц. Ферриты Mn-Zn имеют относительно высокое значение электропроводности, что также может быть использовано для разработки эффективных высокочастотных диэлектрических свойств их композитов.

Диэлектрические свойства - одни из важнейших свойств ферритов, которые сильно зависят от условий приготовления, например, от времени спекания, температуры, вида и количества добавок. В статье [15], например, исследовались спектры диэлектрической проницаемости композиционных материалов, на основе гранулированных магнитомягких ферритов Mn-Zn и Ni-Zn в парафине, поливинилацетатном клее и силиконовых герметиках для различных концентраций ферритной фазы и размеров гранул феррита.

Композиты на основе магнитомягких ферритов Mn-Zn и Ni-Zn в парафиновых матрицах, силиконовых герметиках и поливинилацетатных клеях были приготовлены с использованием гранулированных ферритных порошков марок 700НН, 2000НН и 1000НН со следующим химическим составом: $\text{Mn}_{0.58}\text{Zn}_{0.26}\text{Fe}_{0.16}\text{Fe}_2\text{O}_4$, $\text{Mn}_{0.676}\text{Zn}_{0.227}\text{Fe}_{0.097}\text{Fe}_2\text{O}_4$ и $\text{Ni}_{0.32}\text{Zn}_{0.68}\text{Fe}_2\text{O}_4$ соответственно. Ферритовые материалы были получены по стандартной керамической технологии. В качестве исходных материалов использовалась смесь оксидов Fe_2O_3 , ZnO и NiO или MnO_2 . После измельчения в ротационной мельнице смесь прокаливали при 900-1100 °С в зависимости от состава для получения порошков феррита. Синтезированные порошки измельчали в вибромельнице с добавлением 1 масс.% легирующего агента в виде порошкового оксида висмута. Приготовленные порошки феррита помещали в гранулятор на вращающуюся подложку и распыляли штукатурный агент, состоящий из 5 % поливинилового спирта. При смачивании порошок уплотняется, образуя гранулы разного размера, которые разделяются на фракции с помощью сортировочного сита. Наименьший размер гранул был менее 45 микрон, а самые крупные - от 500 до 630 микрон. Гранулы имели форму, близкую к сферической, средний размер отдельных частиц в гранулах составляет около 2-3 мкм. На рисунке 13 представлена типичная СЭМ-микрофотография гранулированных порошков, на которой можно различить отдельные частицы.

Смесь диэлектрического материала и гранулированных ферритов в необходимом соотношении нагревали в керамическом блюде при непрерывном перемешивании. После некоторого охлаждения и частичного застывания смесь поступала в формы.

Комплексные диэлектрическая и магнитная проницаемости измерялись различными методами в зависимости от диапазона частот. В диапазоне частот 0,3–1300 МГц измерения проводились измерителем комплексных коэффициентов передачи «Обзор-103». В диапазоне частот 1–3000 МГц использовался метод импеданса с помощью анализатора импеданса Agilent E4991A. В диапазоне частот 1–10 ГГц использовался резонансный метод на основе измерителя коэффициента стоячей волны Panoramic серии P2. Форма образца также зависела от полосы частот и параметра измерения.

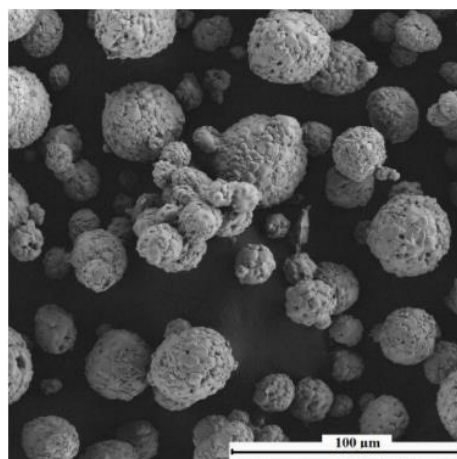


Рисунок 13 – Гранулированный ферритовый порошок 2000НМ с размером частиц <45 микрон

Были исследованы диэлектрическая проницаемость и спектры магнитной проницаемости композитов феррита Mn-Zn и Ni-Zn для различных массовых концентраций и размеров гранул феррита. Типичные спектры проницаемости для феррита Ni-Zn и его композитов показаны на рисунках 14 и 15.

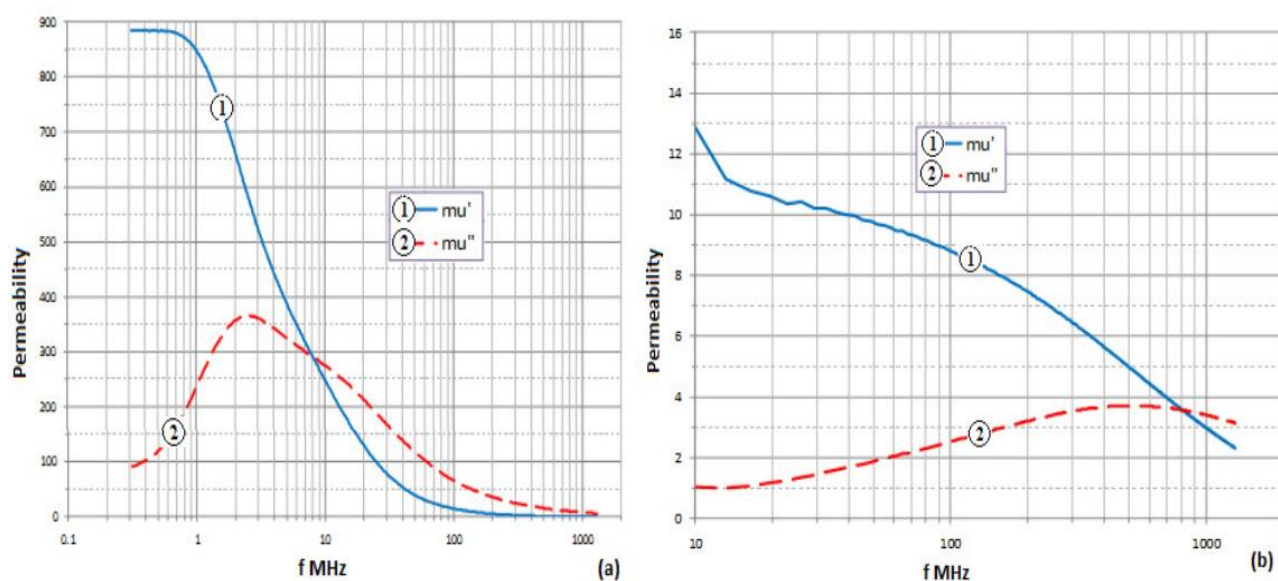


Рисунок 14 – Спектры проницаемости для (а) чистой ферритовой керамики Ni-Zn 1000НН; и (б) его композита в парафине (массовая концентрация ферритного наполнителя 89 масс.%, размер гранул 200 мкм; кривые, отмеченные цифрами 1 и 2, действительная и мнимая части соответственно)

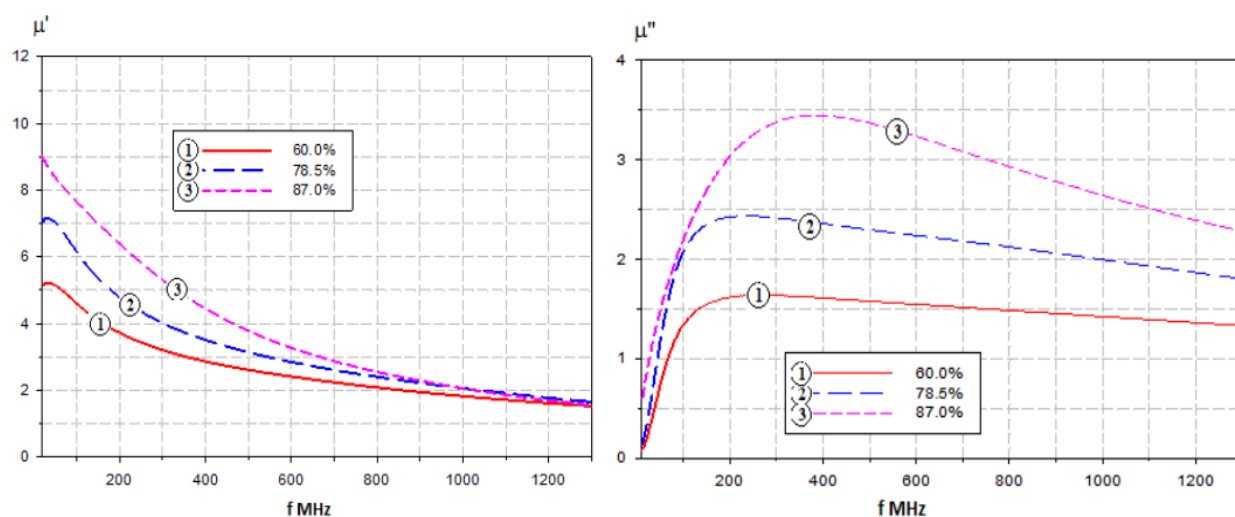


Рисунок 15 – Магнитная проницаемость (действительная и мнимая части) композитов из гранул феррита Ni-Zn 1000НН в парафине для различных концентраций феррита в масс. %: 1–60, 2–78,5, 3–87,7

Видно, что спектры проницаемости образцов композитов намного шире: частота, на которой мнимая часть имеет максимум, смещается в сторону 100–400 МГц. Подобное поведение проницаемости наблюдается для керамики Mn-Zn феррита 2000НМ и их композитов в матрице силиконового герметика, как показано на рисунке 16.

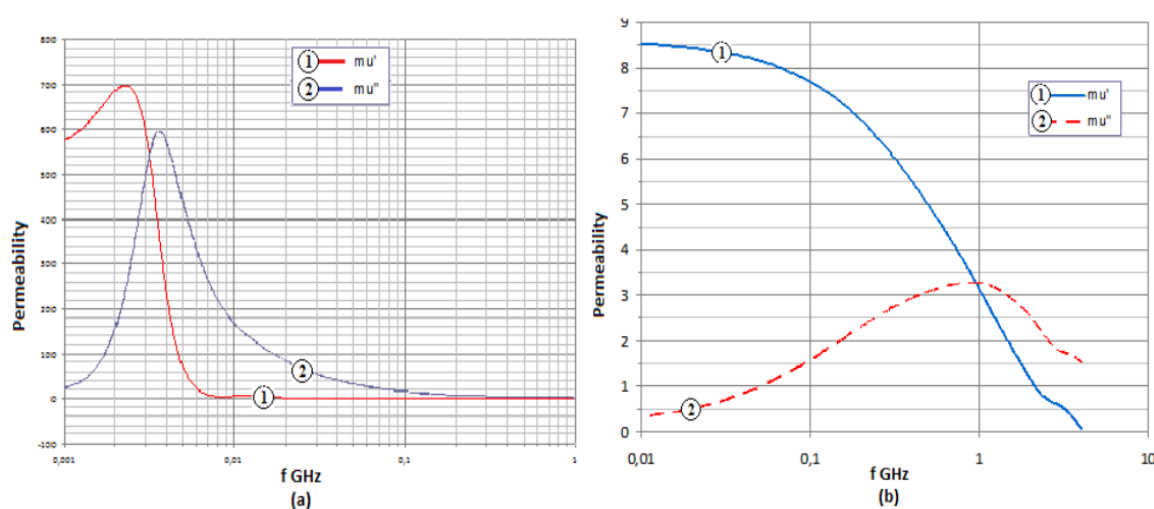


Рисунок 16 – Спектры проницаемости для (а) ферритовой керамики Mn-Zn 2000НМ; (б) его композита в силиконовом герметике (концентрация наполнителя 80 масс. %, размер гранул <45 мкм; кривые, отмеченные цифрами 1 и 2, действительная и мнимая части соответственно)

На рисунке 17 представлены результаты спектров диэлектрической проницаемости феррита Ni-Zn и его композитов. Видно, что в керамических образцах дисперсия сильнее, но на частотах выше 10 МГц значения диэлектрической проницаемости композитных образцов пропорционально ниже, чем у чистой керамики.

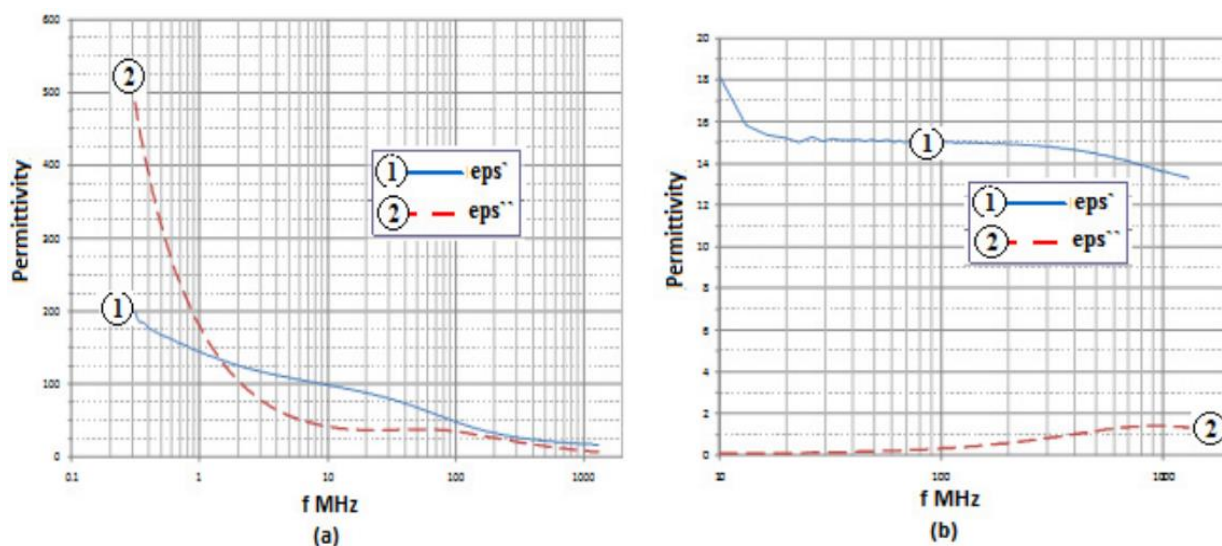


Рисунок 17 – Спектры диэлектрической проницаемости для (а) ферритовой керамики Ni-Zn 1000НН; (б) композита в парафине (концентрация ферритового наполнителя 89 масс.%, размер гранул 200 мкм; кривые, отмеченные цифрами 1 и 2, действительная и мнимая части соответственно)

На рисунке 18 представлены экспериментальные спектры реальной части диэлектрической проницаемости композитов Mn-Zn феррита с матрицей силиконового герметика в сравнении с диэлектрической проницаемостью матрицы и объемных ферритов. Композиты с более высокой массовой концентрацией имеют повышенные значения диэлектрической проницаемости по сравнению с чистым ферритом. Этот эффект сильнее для низких частот и более высоких концентраций. Мы также можем заметить, что диэлектрическая проницаемость композитов показывает частотную дисперсию, которая не наблюдается для чистых материалов в частотном диапазоне ГГц. Диэлектрическая проницаемость также выше для композитов с более крупными гранулами. Такое усиление не наблюдалось в композитах на основе феррита Ni-Zn (рисунок 17), которые отличаются гораздо более высоким значением удельного электросопротивления.

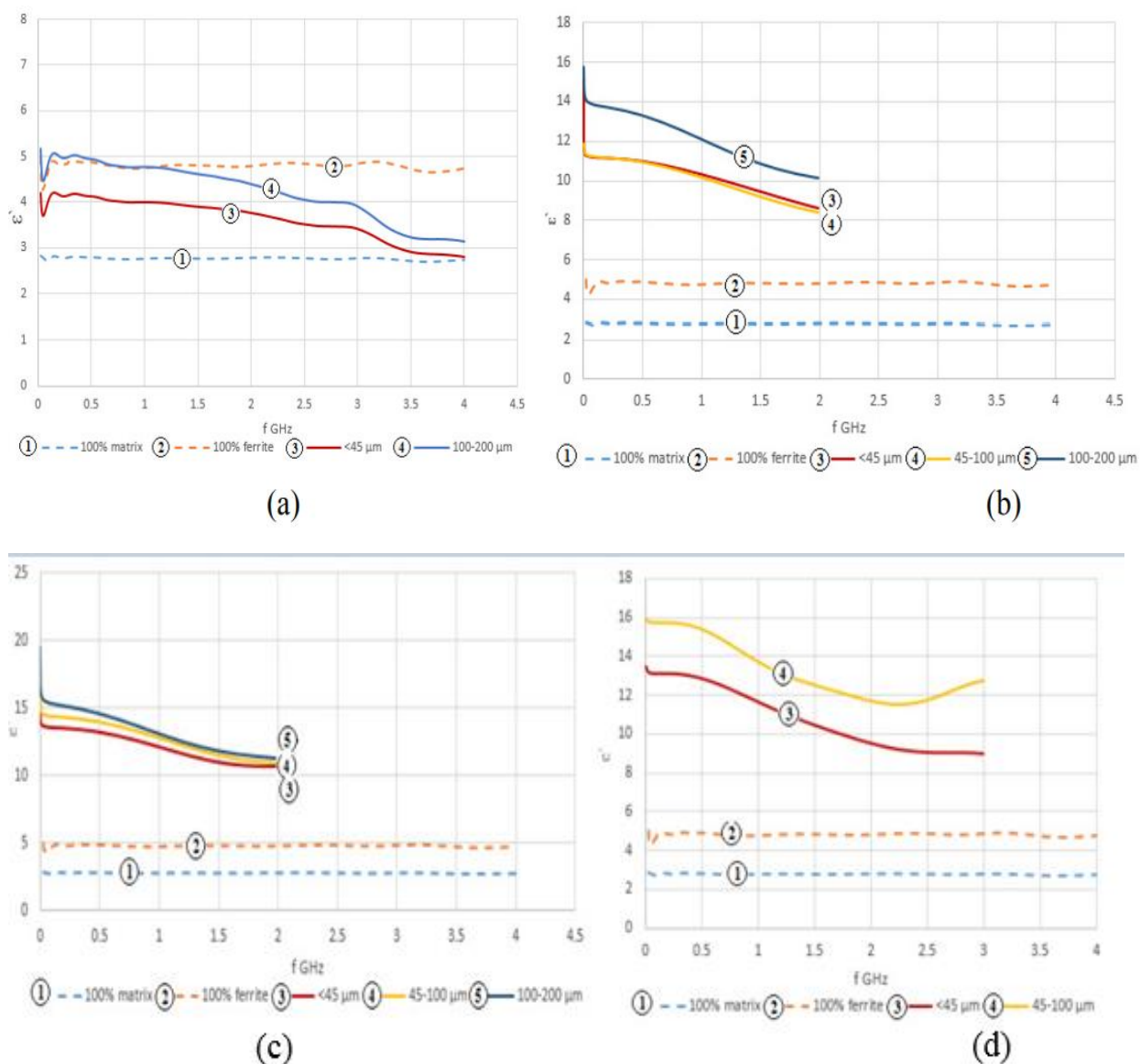


Рисунок 18 – Спектры диэлектрической проницаемости композитов Mn-Zn феррита 2000НМ с матрицей кремниевого герметика для различных размеров гранул феррита: 3 - <45 мкм, 4 - 45-100 мкм и 5 - 100-200 мкм; и различные массовые концентрации: (a) - 40%, (b) - 70%, (c) - 75%, (d) - 80%. Для сравнения приведены данные для матрицы (1) и чистого керамического феррита (2)

Результаты спектров диэлектрической проницаемости композитов с ферритовыми наполнителями марки 700НМ и с различными типами диэлектрической матрицы демонстрируют аналогичное поведение.

Спектры проницаемости ферритовых композитов Mn-Zn и Ni-Zn показывают ожидаемое поведение с гораздо более широкой частотной дисперсией по сравнению

со спектрами чистого феррита. Это вызвано широким распределением частот ферромагнитного резонанса из-за размагничивающих полей на границах частиц и гранул. Пик проницаемости на низких частотах, связанный с резонансами доменных границ, также исчезает в составных спектрах.

Наиболее интересные результаты получены для диэлектрической проницаемости композитов Mn-Zn, которая повышена по сравнению со сплошными ферритами. Он также показывает частотную дисперсию, не наблюдаемую в чистых материалах. Поскольку ферриты Ni-Zn имеют гораздо более низкую проводимость, предполагалось, что эффект усиления связан с проводящими свойствами. Хорошо известно, что композиты с проводящими наполнителями из наногранул могут иметь высокую диэлектрическую проницаемость. Дисперсия диэлектрической проницаемости зависит также от размера гранул, который является более значительным для композитов феррита Mn-Zn. Это может быть связано с отклонением от сферической формы при увеличении размеров и изменением условий взаимодействия частиц. В частности, увеличение аспектного отношения проводящих частиц приводит к увеличению диэлектрической проницаемости.

Правда вышеизложенные соображения авторов статьи вызывают обоснованное сомнение. Поскольку ни в наших исследованиях схожих материалов, ни в работах других зарубежных авторов эффекта увеличения диэлектрической проницаемости (выше значений для сплошного материала) при уменьшении размеров частиц ферритов ранее никогда не наблюдалось. Полученные результаты вероятно связаны с неточностями в процессе измерения образцов.

Ферриты применяются в устройствах связи терагерцового диапазона. Разработка пассивной и активной ТГц коммуникационной электроники важна для реализации сверхширокополосных систем беспроводной связи следующего поколения. Поэтому данная область изучения ферритов становится все более актуальной. В статье [16], например, исследуются диэлектрические свойства ферритов марганцево-кобальта (MnCo) в диапазоне частот от 0,2 ТГц до 0,9 ТГц. Ферриты MnCo являются примером мягких ферритов, которые имеют структуру обратной шпинели. Его состав - $Mn_xCo_{1-x}Fe_2O_4$, где x может находиться в диапазоне от 0 до 1 и определяет соотношение Mn и Co в образце. В статье исследуются $Mn_xCo_{1-x}Fe_2O_4$ с тремя раз-

личными отношениями: $x = 0,3$, $x = 0,5$ и $x = 0,7$. Образцы были приготовлены методом современной керамической обработки. Показатель преломления, коэффициент экстинкции и комплексная диэлектрическая проницаемость были рассчитаны из спектров пропускания в ТГц диапазоне, записанных с помощью системы терагерцовой спектроскопии во временной области (ТГц-TDS).

Измерения проводились с помощью системы пропускания ТГц-TDS с использованием линз ТГц вместо эллиптических зеркал. Эта установка представлена на рисунке 19.

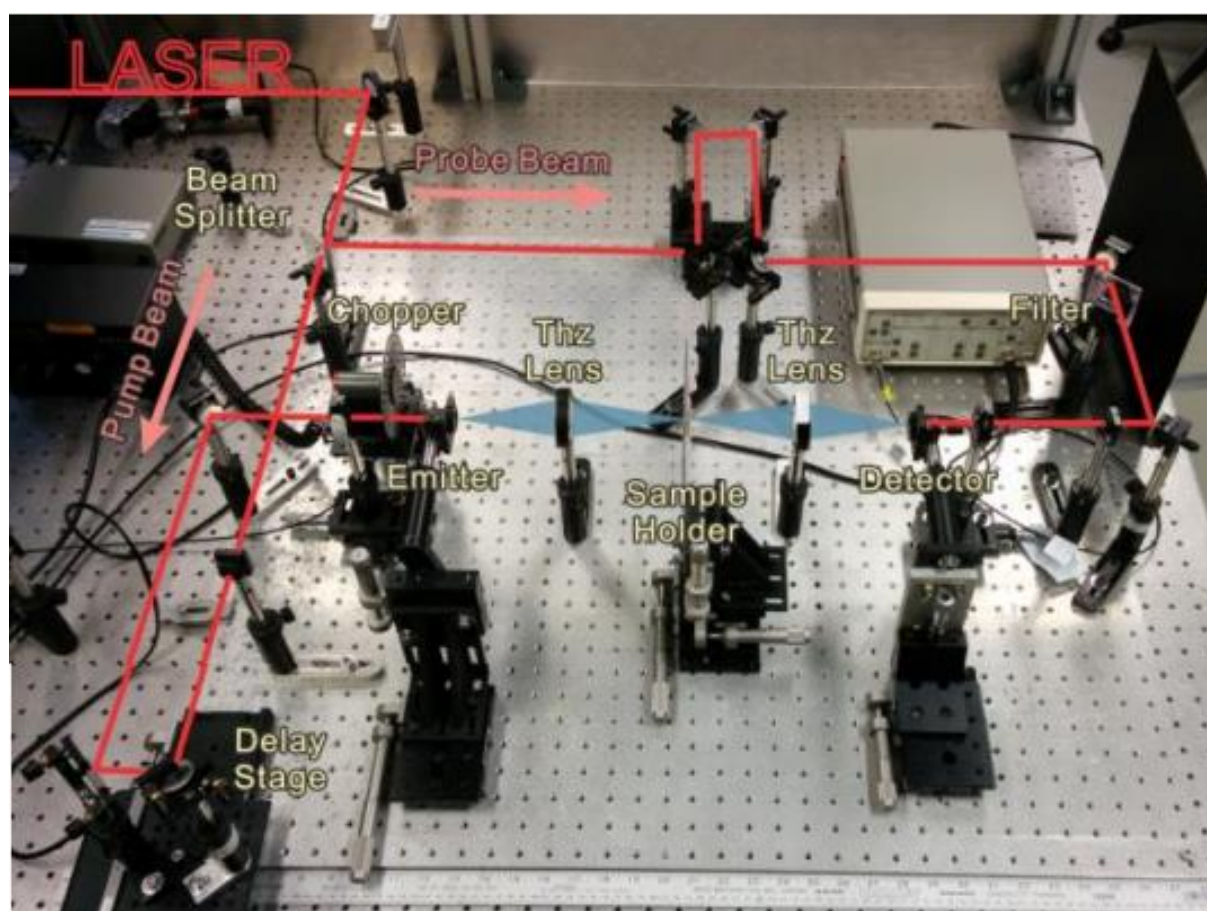


Рисунок 19 – Система ТГц-TDS

Образцы в этой статье имеют три различных отношения (0,3, 0,5 и 0,7) и названы здесь как $\text{MnCo}_{0,3}$, $\text{MnCo}_{0,5}$ и $\text{MnCo}_{0,7}$ соответственно. Образцы были изготовлены с помощью современной обработки керамики, которая включает измельчение и смешивание порошков, предварительное спекание для начала образования фазы обращенной шпинели, прессование в желаемой форме, спекание и обработку

поверхности. Диаметр всех образцов составляет около 6,4 мм, а их толщина составляет: 1,72 мм для $\text{MnCo}_{0,3}$; 1,533 мм для $\text{MnCo}_{0,5}$; и 2,87 мм для $\text{MnCo}_{0,7}$. Используя оптический микроскоп с освещением в ярком поле (BF), мы можем заметить увеличение пористости от $\text{MnCo}_{0,3}$ до $\text{MnCo}_{0,7}$. Когда оптический микроскоп работает с освещением темного поля (DF), агломерация материала более заметна. На рисунке 20 представлены изображения трех образцов с BF и DF освещением.

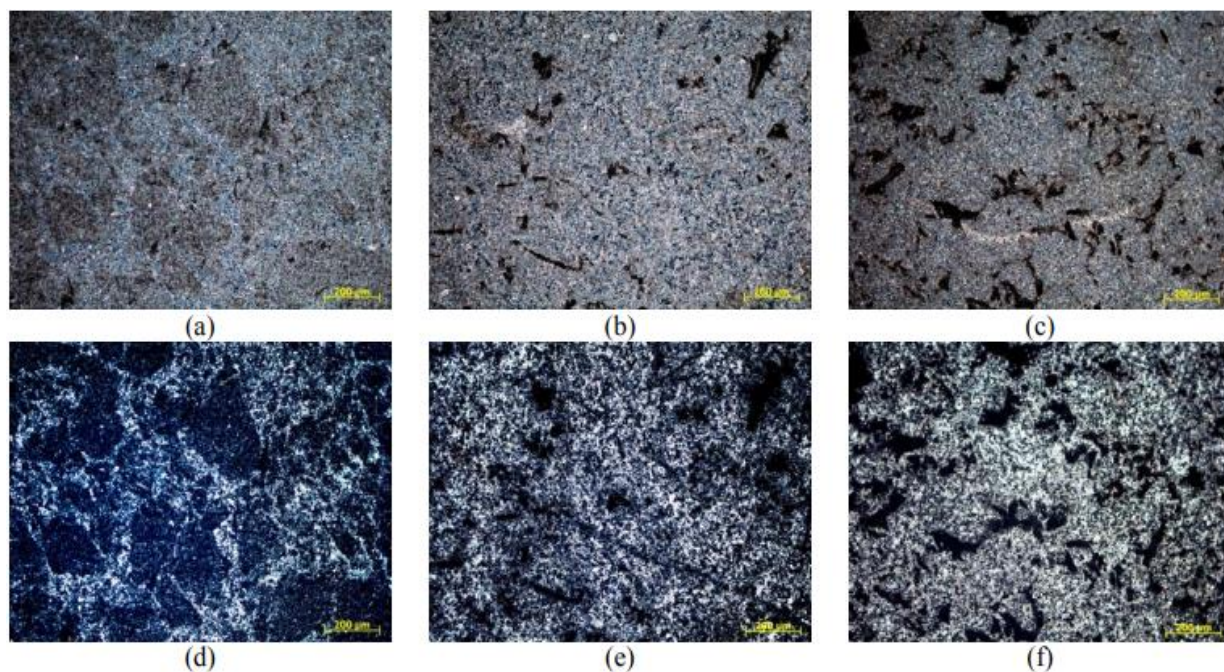


Рисунок 20 – Оптическая микроскопия: (a) $\text{MnCo}_{0,3}$ с подсветкой BF; (b) $\text{MnCo}_{0,5}$ с подсветкой BF; (c) $\text{MnCo}_{0,7}$ с подсветкой BF; (d) $\text{MnCo}_{0,3}$ с подсветкой DF; (e) $\text{MnCo}_{0,5}$ с DF освещением и (f) $\text{MnCo}_{0,7}$ с освещением DF

Ферриты сложно охарактеризовать на более высоких частотах из-за неоднородности. В зависимости от того, где пятно ТГц луча попадает на материал, результаты могут быть разными. Кроме того, пористость может вызывать дифракцию пучка ТГц диапазона на более высоких частотах. Эти проблемы побуждают проводить измерения на передней и задней стороне образца и сравнивать оба результата.

Все три образца показали хорошее совпадение линий передачи ТГц с обеих сторон. Как видно на рисунке 21, шумы в образцах $\text{MnCo}_{0,3}$ и $\text{MnCo}_{0,5}$ начинаются с 1 ТГц, шумы в образце $\text{MnCo}_{0,7}$ начинаются с 0,9.

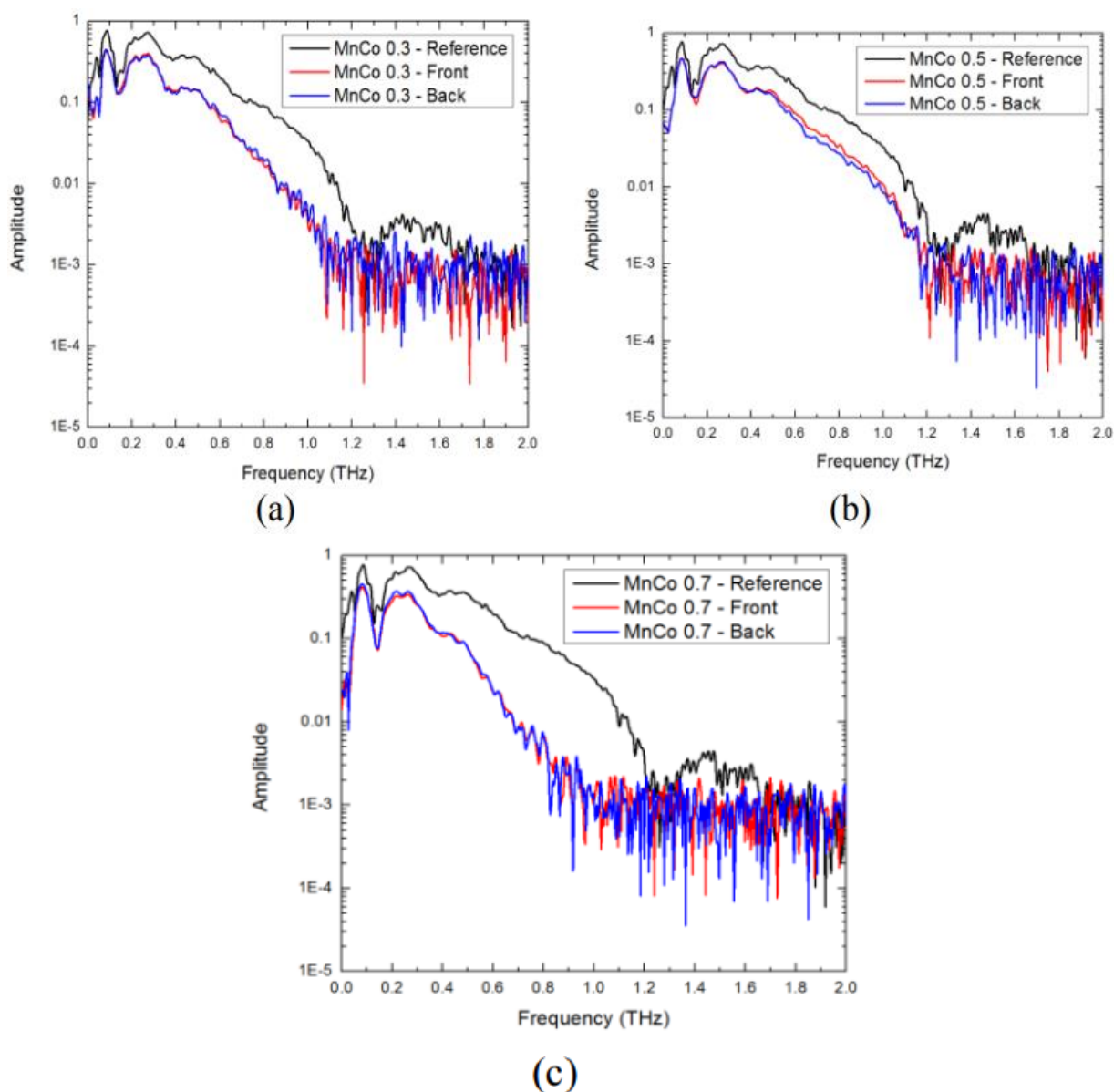


Рисунок 21 – ТГц пропускание MnCo_{0,3} (a), MnCo_{0,5} (b) и MnCo_{0,7} (c)

По линиям передачи на рисунке 21 были рассчитаны оптические константы (показатель преломления n и коэффициент экстинкции k), представленные на рисунке 22. Можно убедиться в хорошем согласовании оптических постоянных на обеих сторонах образцов. Действительная (ϵ') и мнимая (ϵ'') диэлектрическая проницаемость могут быть рассчитаны по n и k : $\epsilon' = n^2 - k^2$ и $\epsilon'' = 2nk$. Тангенс угла потерь ($\tan \delta$) - это отношение мнимой и действительной диэлектрической проницаемости.

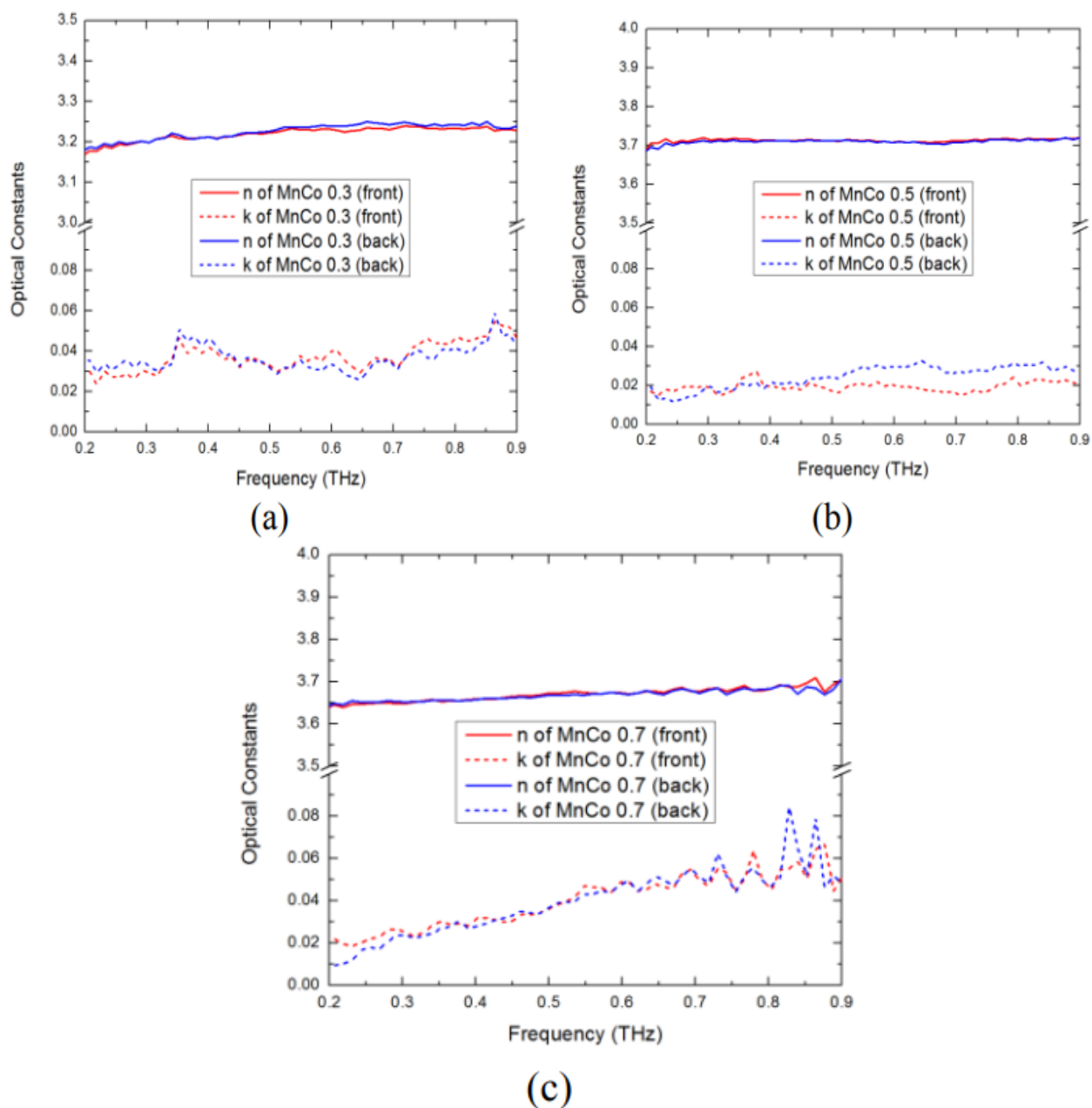


Рисунок 22 - Показатель преломления n и коэффициент экстинкции k для (a) $\text{MnCo}_{0,3}$; (b) $\text{MnCo}_{0,5}$ и (c) $\text{MnCo}_{0,7}$

Поскольку нет частотной зависимости от 0,2 до 0,9 ТГц, мы можем оценить среднее значение для n , k , комплексной диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь. В таблице 4 приведены эти средние значения, рассчитанные по графикам для всех образцов MnCo .

Таблица 4 – Средние значения n , k , ε' , ε'' и $\tan \delta$ для образцов MnCo

	MnCo _{0,3}		MnCo _{0,5}		MnCo _{0,7}	
	Спереди	Сзади	Спереди	Сзади	Спереди	Сзади
n	3,22	3,23	3,71	3,71	3,67	3,67
k	0,04	0,04	0,02	0,02	0,04	0,04
ε'	10,36	10,41	13,78	13,76	13,47	13,46
ε''	0,24	0,24	0,14	0,18	0,29	0,29
$\tan \delta$	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02

На сегодняшний день наиболее популярными материалами для защиты от электромагнитного излучения являются материалы на основе углерода, магнитные металлы, ферриты, а также проводящие полимеры и пены. Среди этих материалов ферриты имеют относительно лучшие свойства диэлектрической и магнитной проницаемости, что приводит к лучшему согласованию импеданса и, следовательно, к широкой полосе пропускания.

Долгосрочные исследования показывают, что ферриты-шпинели являются наиболее подходящим материалом для этой цели из-за их высокой намагниченности насыщения, высокой электрической проницаемости, магнитной проницаемости, невзаимного поведения и хорошей химической стабильности. Кроме того, изолирующая природа ферритов обеспечивает максимальное проникновение ЭМ поля по сравнению с металлическими проводниками, где проникновение ЭМ поля значительно высокой частоты ограничено из-за скин-эффекта. Кроме того, доменные границы магнитных материалов на высоких частотах не могут следовать за полями, поскольку дисперсия доменных границ обычно происходит на частоте 10 ГГц и, следовательно, вызывает поглощение электромагнитной волны высокой частоты.

В последнее время полые магнитные наноструктурированные материалы привлекли огромное внимание исследователей из-за их низкой плотности, высокой пористости, большой площади поверхности и большого объема пор, которые позволяют использовать их в устройствах накопления энергии, материалах с низкой диэлектрической проницаемостью, радиопоглощающих материалах, химических сенсорах и фотонных кристаллах.

Технология терагерцового диапазона (ТГц) в последние годы набирает обороты в области проверки безопасности, получения медицинских изображений, беспроводных датчиков. Кроме того, разрабатываются различные высокочастотные электрооптические приборы, такие как аттенюатор, полосовой фильтр и поляризатор. Следовательно, исследования по экранированию электромагнитных помех в ТГц диапазоне будут очень привлекательными, так как они все еще редко встречаются в литературе.

Ферромагнитный магнетит (Fe_3O_4) является одним из таких ферритов-шпинели, который находит множество применений в защите электронных устройств от электромагнитных помех и космической техники.

Следовательно, дальнейшее изучение их электромагнитных откликов различной морфологии и размеров в ТГц диапазоне частот может дать интересные результаты. Но слабая магнитокристаллическая анизотропия и ослабленная проницаемость из-за эффекта вихревых токов ограничивают использование ферритов в качестве материала для защиты от электромагнитного излучения на высоких частотах. Следовательно, диоксид кремния (SiO_2) был выбран в качестве материала покрытия Fe_3O_4 , поскольку SiO_2 является диэлектриком и изолятором, может подавлять эффект вихревых токов. Это может привести к увеличению поглощения. Полоса поглощения также может быть расширена за счет этого тонкого покрытия.

В статье [17] приведено сравнение поглощающей способности полых наночастиц (ПНЧ), покрытых SiO_2 , различных размеров с твердыми наночастицами (НЧ) Fe_3O_4 . Были синтезированы ферриты Fe_3O_4 ПНЧ с размером частиц 100, 185, 250, 350 и 725 нм с толщиной оболочки 30, 35, 50, 65 и 150 нм соответственно.

На рисунке 23 представлены ПЭМ-изображения ПНЧ Fe_3O_4 , покрытых SiO_2 . На ПЭМ-изображениях наноматериалов $\text{SiO}_2@\text{Fe}_3\text{O}_4$ отчетливо виден контраст между слоем Fe_3O_4 и слоем SiO_2 . Как видно на рисунке 23, оболочка из SiO_2 становится толще с увеличением размера частиц.

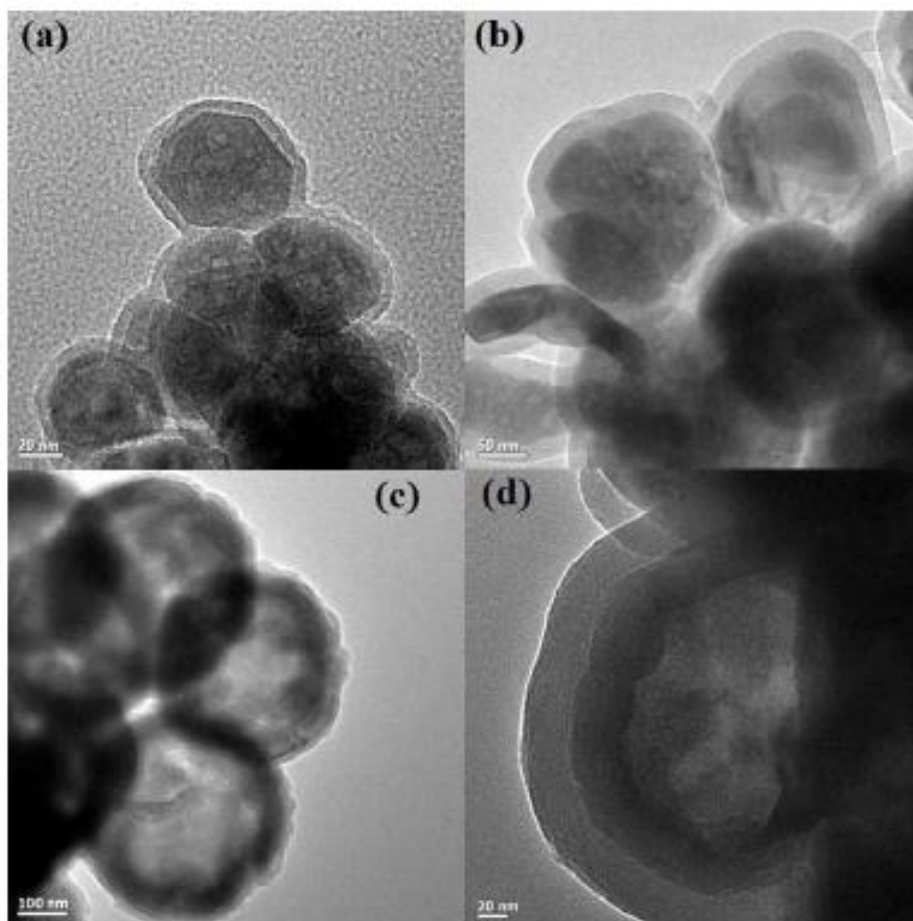


Рисунок 23 – (a) ПЭМ образца Si-ПНЧ-100; (b) ПЭМ образца Si-ПНЧ-185; (c) ПЭМ образца Si-ПНЧ-250; (d) ПЭМ образца Si-ПНЧ-350

Спектры поглощения каждого из НЧ-100, Si-ПНЧ-100, Si-ПНЧ-160, Si-ПНЧ-250, Si-ПНЧ-350 и Si-ПНЧ-750 в диапазоне частот 0,8–2,5 ТГц показаны на рисунке 24. Поглощение всех образцов увеличивается с увеличением частоты ТГц, что аналогично тому. Причина этого заключается в теории поглощения электромагнитного излучения, в котором говорится, что если dI – количество излучения, поглощенного падающим импульсом, распространяющимся в z -направлении через бесконечно малое расстояние dz внутри материала:

$$dI = a_{abs}(\omega)I dz;$$

$$a_{abs}(\omega) = \frac{2\omega k(\omega)}{c},$$

где I – освещенность пучка, a_{abs} коэффициент поглощения, ω - частота падающего ТГц излучения, c - скорость света в свободном пространстве, а $\kappa(\omega)$ - мнимая часть комплексного показателя преломления.

Поскольку интенсивность зависит от расстояния, пройденного лучом, это доказывает, что в полой структуре из-за многократных отражений пройденное расстояние будет больше, а поглощение также будет больше по сравнению с НЧ того же диаметра. Соответственно, было обнаружено, что полное поглощение $\text{SiO}_2@\text{Fe}_3\text{O}_4$ ПНЧ-100 значительно превышает его твердую конфигурацию, имеющую тот же диаметр.

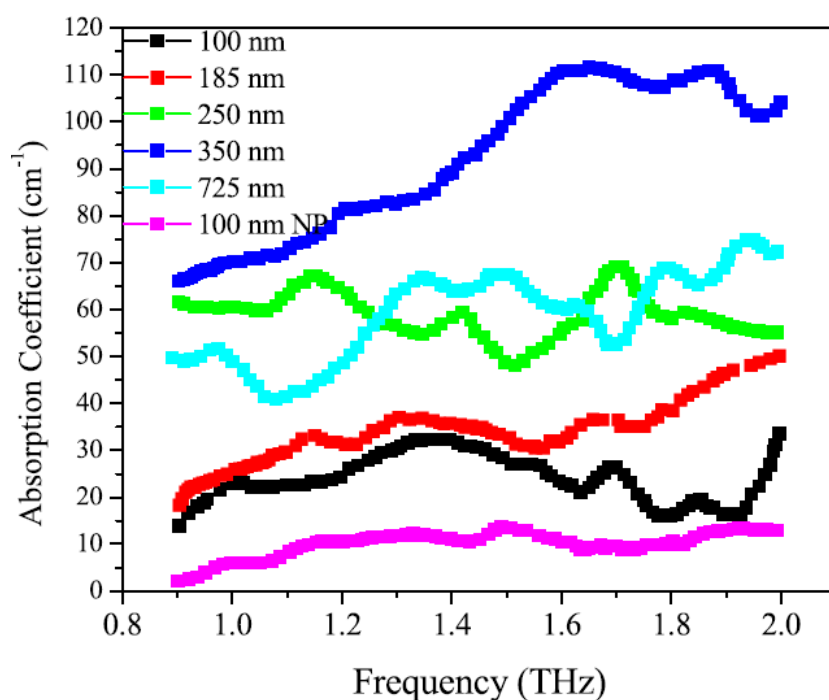


Рисунок 24 – Спектры поглощения синтезированных Fe_3O_4 НП-100 и Si-NHS различного среднего диаметра в диапазоне частот 0,9–2 ТГц

Но в отличие от образцов без покрытия, образцы с покрытием SiO_2 показывают гораздо меньший коэффициент поглощения. Покрытие из SiO_2 может создавать некоторую проблему, из-за которой уменьшается поглощение. Однако тенденция, которой следуют образцы без покрытия, такая же, как и у образцов с покрытием SiO_2 . Коэффициент поглощения увеличивается до 350 нм, а затем уменьшается

до 725 нм. Для дальнейшего исследования причины резкого уменьшения коэффициента поглощения после 350 нм были проведены измерения реальной и мнимой диэлектрической проницаемости.

На рисунке 25 (a) и (b) показаны реальная диэлектрическая проницаемость и мнимая диэлектрическая проницаемость образцов Fe_3O_4 SiO₂ разного размера от 0,8 до 2,0 ТГц.

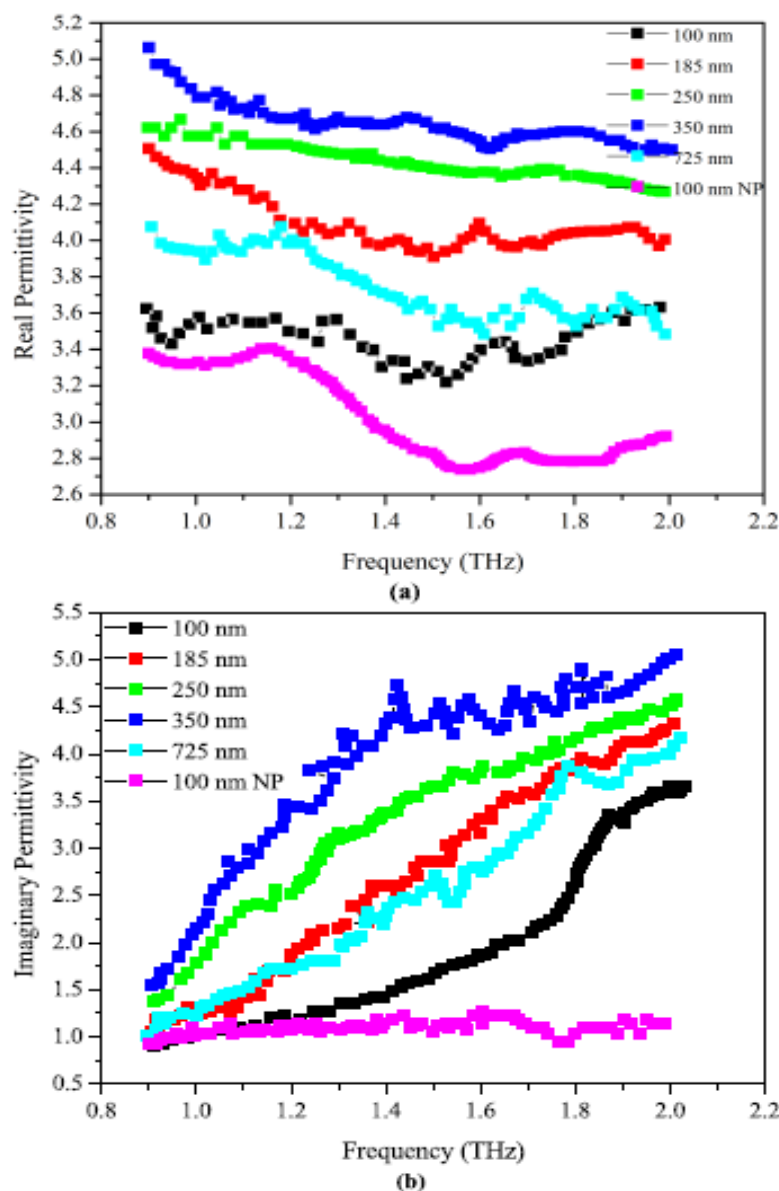


Рисунок 25 (a) реальная диэлектрическая проницаемость синтезированных Fe_3O_4 НЧ-100 и Si-ПНЧ различного диаметра в диапазоне частот 0,9–2 ТГц; (b) мнимая диэлектрическая проницаемость синтезированных Fe_3O_4 НЧ-100 и Si-ПНЧ различного диаметра в диапазоне частот 0,9–2 ТГц

Кристаллическая структура, размер, геометрическая морфология и различная поляризуемость материала, такая как электронная, ионная и дипольная, оказывают заметное влияние на диэлектрическую проницаемость материала. Полая сферическая структура Fe_3O_4 приводит к двухслойной структуре, которая помогает создавать большое количество зарядовых мультиполей на каждой границе раздела при взаимодействии с ТГц излучением. НЧ будет иметь единый интерфейс и, следовательно, он не сможет удерживать множество мультиполюсных зарядов. В результате этого большая реальная диэлектрическая проницаемость полых сфер увеличивается в большей степени, чем диэлектрическая проницаемость НЧ, показанная на рисунке 25 (a).

Диэлектрическая проницаемость Fe_3O_4 SiO_2 ПНЧ ядро-оболочка увеличивается с удельной площадью поверхности до ПНЧ-350, и с этого момента наблюдается значительное уменьшение до ПНЧ-725, имеющего среднюю толщину оболочки 150 нм. Причина может заключаться в том, что толщина оболочки ПНЧ-725 составляет 150 нм, что сопоставимо с размером НЧ-100. Но диэлектрическая проницаемость не увеличивается в результате покрытия SiO_2 . Слой SiO_2 является дополнительным слоем, который может препятствовать плавному поглощению ТГц излучения. По этой же причине коэффициент поглощения резко уменьшается после 350 нм.

Таким образом, было выявлено, что ПНЧ $\text{SiO}_2@\text{Fe}_3\text{O}_4$ могут поглощать ТГц излучение, но не так хорошо, как ПНЧ Fe_3O_4 . Дополнительный слой SiO_2 создает препятствие в поглощении. Несмотря на это, поглощение достаточно хорошее. Величина поглощающей способности существенно зависит от диэлектрических свойств материала.

1.7 Применение ферритов

Среди магнитных материалов, используемых в технике, обладающей высокой частотой (более 100 кГц), лучше всех себя зарекомендовали ферриты, так как они обладают уникальным сочетанием высоких магнитных свойств и низкой электропроводностью. Ферриты используются: в военной сфере – для снижения радиолокационной заметности объектов, в радиотехнике – для обеспечения электромагнитной совместимости, в компьютерных технологиях – для защиты от перехвата секретной

информации, в строительной сфере – при изготовлении цемента, в СВЧ технике (резонатор, вентиль, волновод и т.д.), при создании радиопоглощающих материалов, в автоматике, вычислительной технике, мобильной связи, электронике (поглотители электромагнитных волн, антенны, сердечники, постоянные магниты, генераторы, трансформаторы, конденсаторы, резисторы, катушки, индуктивности датчики, кабели электроприборов и т.д.).

Гексагональные ферриты в свою очередь, являются самыми применяемыми (рисунок 26) [4].



Рисунок 26 – Области применения гексагональных ферритов [4]

2 Экспериментальная часть

В данной части работы представлено сравнительное исследование электромагнитных характеристик экспериментальных образцов двух типов. Первый тип образцов состоит из измельченного до размеров частиц менее 100 мкм феррита, смешенного со связующим в виде эпоксидной смолы. А второй тип образцов состоит из цельного прессованного феррита. Заготовкам обоих типов образцов для проведения измерений придают формы коаксиальной шайбы.

Материал А – порошок феррита зарубежного производства, структуры шпинели не уточненного химического состава, с размерами частиц менее 100 мкм. Он используется для оснащения сверхширокодиапазонных многофункциональных безэховых камер и экранированных помещений, обеспечивающих проведение радиотехнических измерений и испытаний технических средств на соответствие нормам и требованиям электромагнитной совместимости. Техническим результатом является обеспечение исключения излучения за пределы камеры (помещения) радиосигналов. Покрытие камеры представляет собой трехслойную конструкцию, состоящую из диэлектрического материала, магнитного материала и металлической подложки. Магнитный материал представляет собой пластины толщиной 8,5–12 мм из никель-цинкового феррита. Данный феррит производится в Корее. Точная химическая формула исследуемого феррита, к сожалению, неизвестна.

Материал Б – порошок отечественного никель-цинкового феррита структуры шпинели марки М400НН с химической формулой $\text{NiZnFe}_2\text{O}_4$, с размерами частиц менее 100 мкм. Он из-за сравнительно низких потерь на высоких частотах, широко используется в сердечниках для бытовой и специальной радиоэлектронной аппаратуры и в устройствах проводной дальней связи.

Главная цель данных исследований состоит в том, чтобы установить целесообразность замены корейского феррита российским в производстве безэховых камер. А так как в безэховых камерах используется именно сплошной феррит, т.е. он не поддается измельчению и заливки в формы как в нашем первом способе, поэтому данный эксперимент необходим.

2.1 Методика изготовления образцов

Композиционный материал представляет собой полимеризованную смесь наполнителя и связующего вещества, взятый в определенном соотношении. Состав экспериментального композиционного материала: 20 % (40 %, 60 %) связующего вещества + 80 % (60 %, 40 %) ферритового порошка. В качестве связующего вещества композиционного материала была выбрана эпоксидная смола (ЭДП-20) и отвердитель (ПЭПА). Изготовленные образцы представляют собой плоские шайбы для измерения в коаксиальной ячейке. Размеры образцов: внешний диаметр $d_{внеш}=7$ мм, внутренний диаметр $d_{внут}=3$ мм, толщина $h \approx 2,25$ мм. В результате нами были получены следующие образцы: $\text{BaCo}_{0,6}\text{Zn}_{1,4}\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ – 80 масс.%, $\text{BaCo}_{1,0}\text{Zn}_{1,0}\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ – 80 масс.%, $\text{BaCo}_{0,7}\text{Zn}_{1,3}\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ – 80 масс.%, $\text{BaCo}_{0,8}\text{Zn}_{1,2}\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ – 80 масс.%, $\text{NiZnFe}_2\text{O}_4$ – 40 масс.%, $\text{NiZnFe}_2\text{O}_4$ – 60 масс.%, $\text{NiZnFe}_2\text{O}_4$ – 80 масс.%, а так же образец «А» с соответствующими концентрациями. На рисунке 27 представлена поэтапная схема изготовления образцов.

Из методики изготовления образцов можно выделить следующие этапы:

- а) Выбор необходимого ферритового порошка и просеивание его через сита, с целью отбора мельчайших частиц (размеры ячеек сит менее 100 мкм).
- б) Подготовка исходных компонент, в данном случае ферритового порошка, эпоксидной смолы и отвердителя.
- в) Расчет процентного соотношения порошка и связующего в составе будущего образца, в данном случае 20 % (40 %, 60 %) связующего вещества + 80 % (60 %, 40 %) ферритового порошка. Связующее в свою очередь, состоит из 85 % эпоксидной смолы и 15 % отвердителя. При расчете, компоненты взвешиваются на электронных весах, которые измеряют вес с точностью до 0,001 г.
- г) Далее происходит тщательное смешивание рассчитанного количества компонентов и заполнение полученной смесью специальных форм с необходимыми размерами.
- д) Полимеризация образцов происходит при комнатной температуре и занимает около 24 часов.
- е) Извлечение образцов из форм следует производить аккуратно, так как на данном этапе можно испортить образец. В некоторых случаях, при затруднении

извлечения приходится подвергнуть форму с образцом термическому воздействию, т.е. немного нагреть ее техническим феном, это намного упрощает задачу.

ж) Механическая обработка извлеченного образца производится с целью придания ему размеров, соответствующих внутренним размерам коаксиальной ячейки. Образец закрепляется в специальном точильном приспособлении и стачивается на наждачной бумаге с периодическим контролем размеров, чтобы ни в коем случае не переточить образец.

з) Контрольное измерение с помощью микрометра. В результате получаем плоские шайбы для измерения в коаксиальной ячейке. Размеры образцов: внешний диаметр $d_{внеш}=7$ мм, внутренний диаметр $d_{внут}=3$ мм, толщина $h=2,25$ мм.



Рисунок 27 – Этапы изготовления образцов

На рисунке 28 представлена поэтапная схема изготовления образцов из цельного куска ферритовой керамики.

Способ изготовления экспериментальных измерительных образцов второго типа состоит из следующих этапов:

а) Подбор необходимых ферритовых заготовок, а именно, это должен быть как минимум параллелепипед со сторонами не менее 9 мм и толщиной не менее

2,25 мм. В нашем случае они вырезались из более массивных заготовок на циркулярной пиле с алмазным напылением.

- б) Механическая обработка до нужной толщины 2,25 мм.
- в) Закрепление заготовок на подложке с помощью парафина и в металлическом корпусе для удобства сверления заготовок.
- г) Сверление заготовок на фрейзерносверлильном станке. Диаметр сверла 3 мм. Чтобы не сломать образцы, сверлить нужно со скоростью около трех оборотов в секунду. Так как сверло и сами образцы быстро нагреваются и высока вероятность поломки, в корпус с образцами наливается холодная вода, которая периодически меняется, чтобы снижать температуру.
- д) Далее снова следует механическая обработка. Обтачивается уже внешний и внутренний диаметр будущей шайбы.

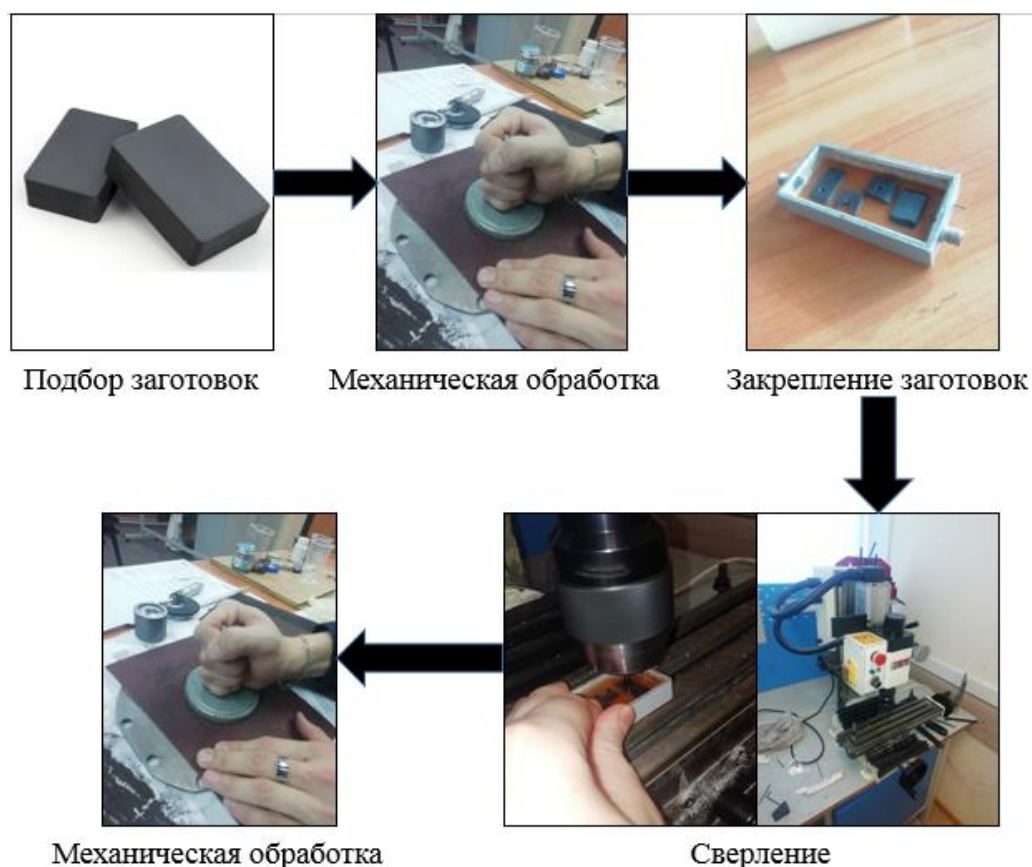


Рисунок 28 – Этапы изготовления образцов

В результате нами были получены следующие образцы: $\text{BaCo}_{1,0}\text{Zn}_{1,0}\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$, $\text{NiZnFe}_2\text{O}_4$ и образец А (зарубежный феррит) в виде сплошных керамических шайб для измерений в коаксиальной ячейке.

2.2 Измерительное оборудование

Измерения проводились волноводным методом в коаксиальной измерительной ячейке с помощью двух установок фирмы «Микран». Это измеритель модуля коэффициента передачи и отражения P2M-04 (от 10 МГц до 4 ГГц.) и векторный анализатор цепей P4M-18 (от 10 МГц до 18 ГГц), подключенные по схеме «на проход». Измерения позволили получить частотную зависимость модуля коэффициента прохождения (T), отражения (R) и рассчитать коэффициент поглощения (A), а также на основе измерений векторного анализатора были рассчитаны комплексные магнитные и диэлектрические проницаемости образцов. А теперь рассмотрим каждую из установок немного подробнее.

2.2.1 Скалярный анализатор цепей P2M-04

Измеритель P2M-04 (рисунок 29) предназначен для измерения модуля коэффициента отражения или коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) и модуля коэффициента передачи (ослабления и усиления) в диапазоне частот 0,01–4,00 ГГц. Прибор работает в составе с ЭВМ, которая выполняет ряд вычислительных функций и обеспечивает панорамное отображение результата измерения [18].

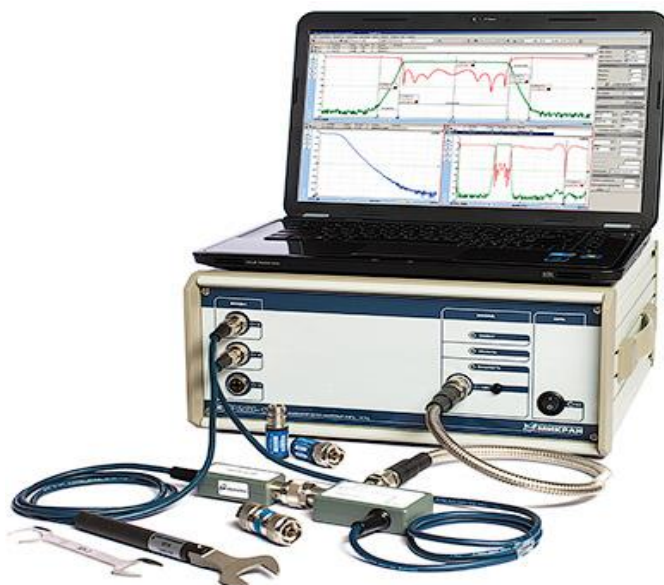


Рисунок 29 – Внешний вид скалярного анализатора цепей P2M-04 [18]

Данный измеритель позволяет реализовать две схемы измерения: «на прохождение» (рисунок 30) и «на отражение» (рисунок 31). В собственных экспериментальных измерениях использовалась схема «на прохождение». Данная схема позволяет измерить одновременно коэффициент отражения (R) и прохождения (T) (коэффициент отражение – мощность излучения, отразившегося от образца, находящегося в коаксиальной ячейке, а коэффициент прохождения – мощность излучения, прошедшего сквозь этот образец). Зная коэффициенты R и T , можно рассчитать коэффициент поглощения (A): $A=1-R-T$. Схема же измерения «на отражение» позволяет измерить отраженную мощность.

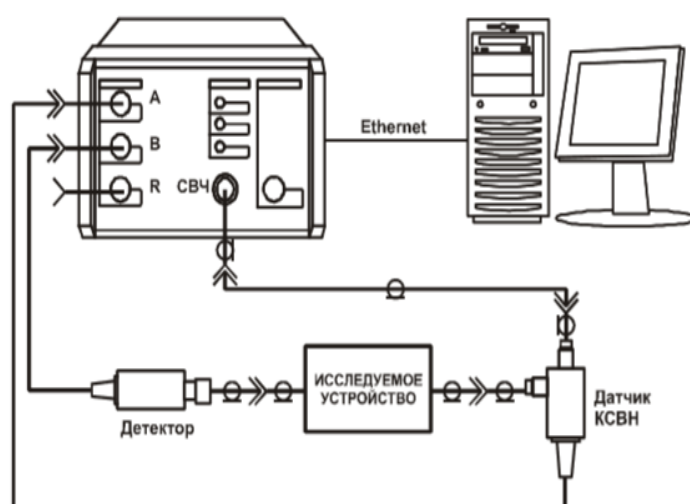


Рисунок 30 – Схема измерения «на прохождение» [18]

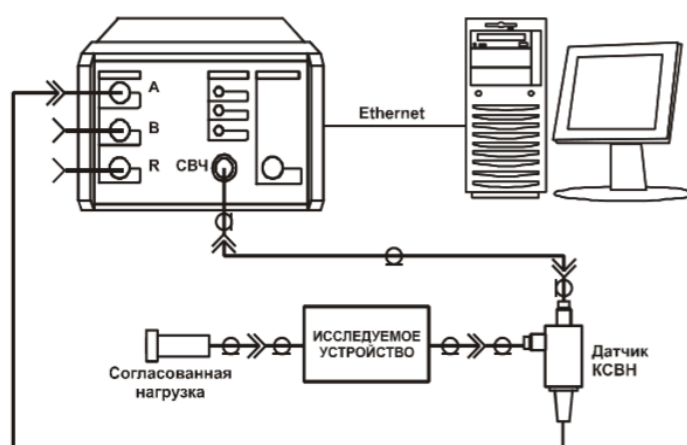


Рисунок 31 – Схема измерения «на отражение» [18]

2.2.2 Векторный анализатор цепей Р4М-18

Измеритель Р4М-18 (рисунок 32) предназначен для измерения комплексных коэффициентов передачи и отражения (S -параметров) двухполюсников и четырехполюсников в диапазоне частот 0,01–18,00 ГГц. Измеритель Р4М объединяет в себе синтезированный источник сигнала, измеритель S -параметров и настраиваемый приемник в одном модуле. Измеритель Р4М-18 работает под управлением персонального компьютера (ПК), который проводит обработку информации от измерителя Р4М-18, выполняет ряд вычислительных функций и обеспечивает различные варианты отображения результатов измерений. Данный измеритель позволяет измерить коэффициенты R , T и фазу, а также рассчитать на основе этих измерений комплексные магнитные и диэлектрические проницаемости образцов [19].



Рисунок 32 – Внешний вид векторного анализатора цепей Р4М-18 [19]

2.2.3 Спектрометр Т-Спес 1000

Спектрометр предназначен для измерения электромагнитного отклика экспериментальных образцов. Схема установки представлена на рисунке 33. В основе работы терагерцового спектрометра лежит принцип когерентного детектирования импульсов терагерцового излучения, прошедшего или отраженного от исследуемого

образца и последующей их обработки математическими методами. Фемтосекундный лазерный импульс расщепляется на импульс накачки и зондирующий импульс, которые используются, соответственно, для генерации и детектирования терагерцовых импульсов. Терагерцовое поле регистрируется как функция временной задержки зондирующего импульса. Преобразование Фурье от волновой формы позволяет получить спектр терагерцового импульса. Исследования проводились в частотном диапазоне от 100 до 1000 ГГц.

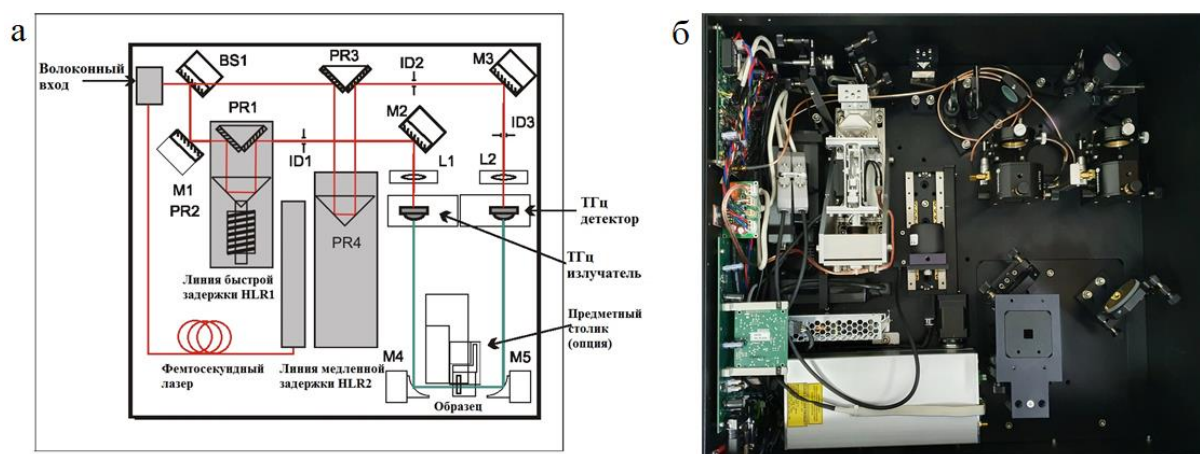


Рисунок 33 – Оптическая схема спектрометра T-Spec 1000 (а); фотография спектрометра T-Spec 1000 (б) (вид сверху)

2.3 Результаты измерений

На рисунке 34 представлены результаты измерения коэффициентов R , T , A композиционного образца, содержащего 80 масс.% $\text{BaCo}_{0.8}\text{Zn}_{1.2}\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ и 20 масс.% связующего. Измерения проводились на двух различных установках: P2M-04 (от 10 МГц до 4 ГГц.) и P4M-18 (от 10 МГц до 18 ГГц) по схеме «на прохождение».

Из графика видно, что с ростом частоты коэффициент передачи снижается и достигает минимума (35 %) на частоте 13,5 ГГц. Это происходит за счет роста коэффициента прохождения и поглощения. Поглощение максимально (около 25 %) на частоте 8 ГГц, а отражение максимально (около 45 %) на частоте 16 ГГц.

Сравнивая результаты измерений на скалярном и векторном анализаторе цепей можно сделать вывод, что они в целом совпадают. Однако более корректные результаты дают измерения на P4M-18. В то же время при измерениях на P2M-04 на

экспериментальных кривых наблюдаются волновые процессы, связанные с объемным резонансом в коаксиальной ячейке. Что бы получить корректные результаты экспериментальные данные необходимо усреднять.

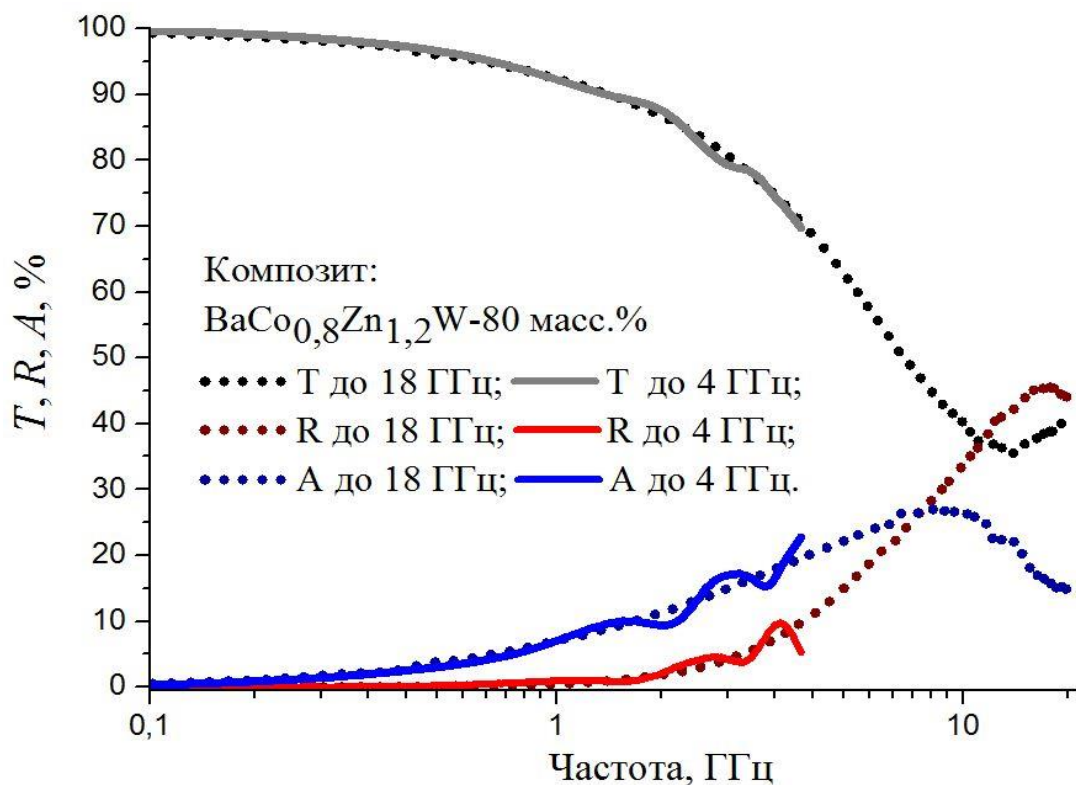


Рисунок 34 – Коэффициенты отражения, прохождения и поглощения

Учитывая выводы, сделанные выше, далее сравним результаты измерений образцов, полученные на векторном анализаторе цепей.

На рисунке 35 приведены результаты измерения коэффициента прохождения для образцов BaCo_{0,6}Zn_{1,4}Fe₁₆O₂₇ – 80 масс.%, BaCo_{0,7}Zn_{1,3}Fe₁₆O₂₇ – 80 масс.%, BaCo_{0,8}Zn_{1,2}Fe₁₆O₂₇ – 80 масс.%. Анализируя результаты, можно заметить, что с ростом частоты коэффициент прохождения убывает, и что в полосе частот 0–8 ГГц наибольшим коэффициентом прохождения обладает образец BaCo_{0,7}Zn_{1,3}Fe₁₆O₂₇ – 80 масс.%, а на частотах свыше 8 ГГц наибольшим коэффициентом прохождения обладает образец BaCo_{0,6}Zn_{1,4}Fe₁₆O₂₇ – 80 масс.%. В итоге на частоте 18 ГГц наименьший коэффициент прохождения у образца BaCo_{0,7}Zn_{1,3}Fe₁₆O₂₇ – 80 масс.%, он составляет примерно 30%. Следует сказать, что коэффициенты прохождения у всех трёх образцов на протяжении всего диапазона частот отличаются друг от друга примерно на 10–20 %.

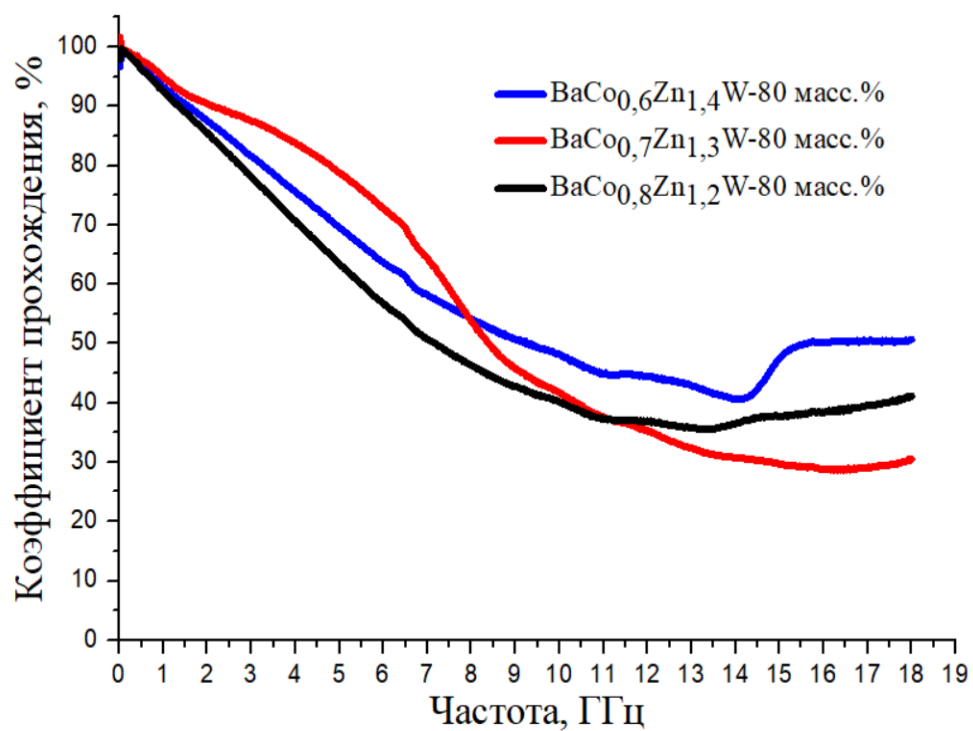


Рисунок 35 – Коэффициент прохождения

На рисунке 36 изображены результаты измерения коэффициента прохождения.

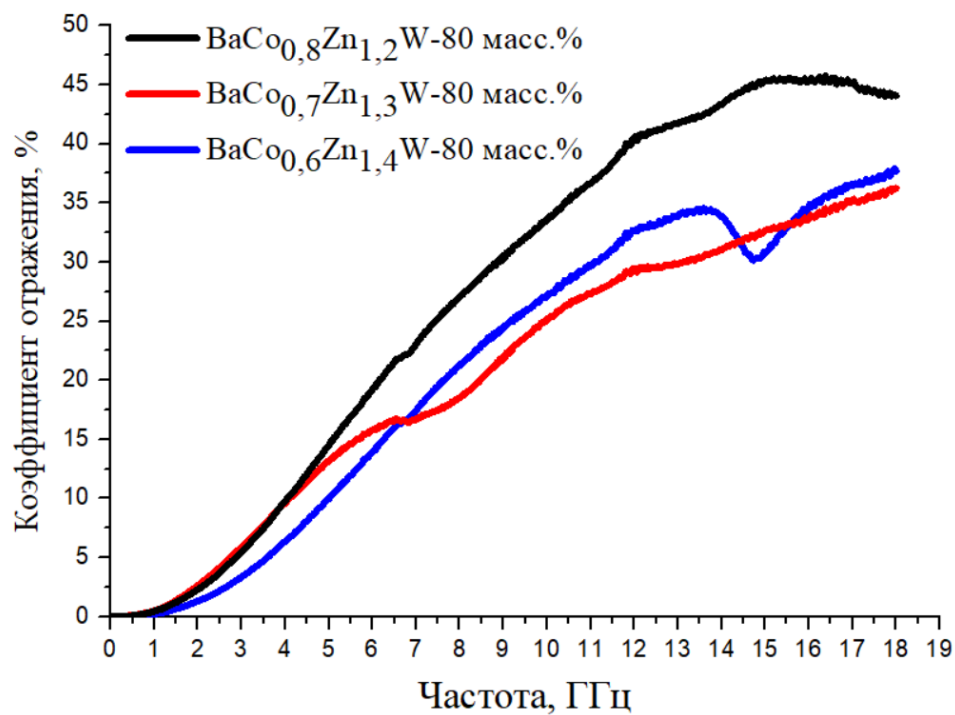


Рисунок 36 – Коэффициент отражения

Глядя на график можно заметить, что с ростом частоты коэффициент отражения возрастает, и что наибольшим коэффициентом отражения обладает образец $\text{BaCo}_{0,8}\text{Zn}_{1,2}\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ – 80 масс.%, на частоте 18 ГГц от него отразилось 45 % излучаемой мощности. В то же время коэффициенты отражения образцов $\text{BaCo}_{0,6}\text{Zn}_{1,4}\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ – 80 масс.% и $\text{BaCo}_{0,7}\text{Zn}_{1,3}\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ – 80 масс.% на всем диапазоне частот отличаются примерно на 5 %. В конце диапазона их коэффициенты отражения составляют примерно 35 %.

Глядя на график зависимости коэффициента поглощения от частоты (рисунок 37) можно заметить, что до 8 ГГц наибольшим коэффициентом поглощения обладает образец $\text{BaCo}_{0,8}\text{Zn}_{1,2}\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ – 80 масс.%, а на частотах свыше 8 ГГц наилучшими поглощающими способностями обладает образец $\text{BaCo}_{0,7}\text{Zn}_{1,3}\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ – 80 масс.% и при 13,5 ГГц достигает значения 38 %.

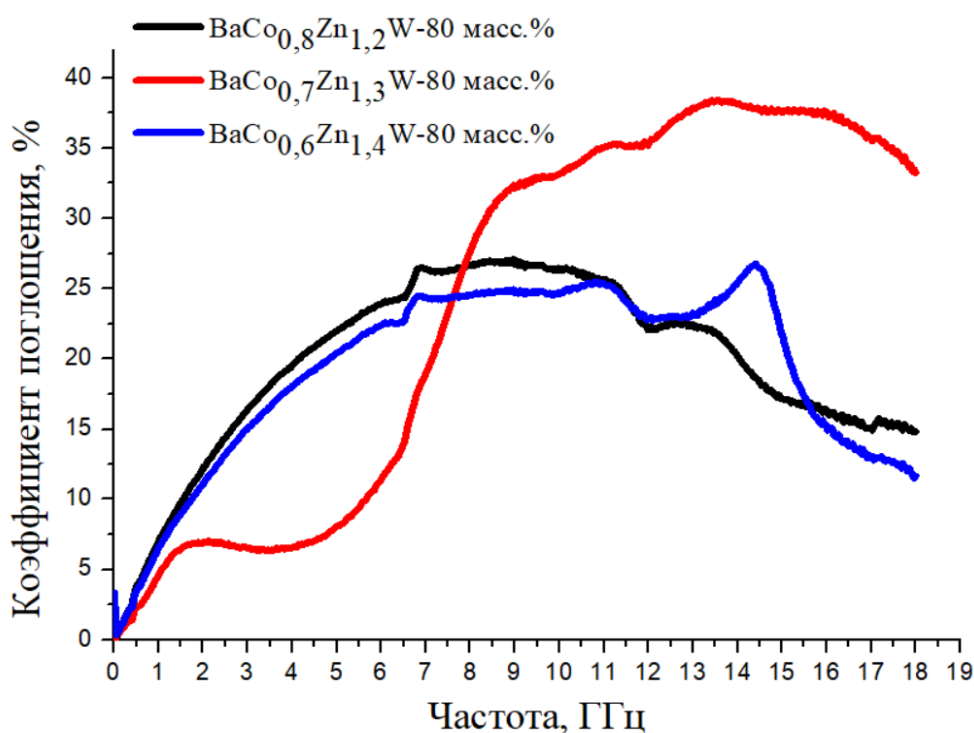


Рисунок 37 – Коэффициент поглощения

На рисунке 38 изображены результаты расчета мнимой и действительной частей диэлектрической проницаемости. Глядя на графики, можно сказать, что значения ε' лежат в диапазоне 4–6,5 ГГц. Так же стоит заметить, что экспериментальная

кривая частотной зависимости мнимой части диэлектрической проницаемости образца $\text{BaCo}_{0,6}\text{Zn}_{1,4}\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ – 80 масс.% имеет своеобразный скачок, лежащий в диапазоне частот 13–16 ГГц. Он связан с не идеальностью используемой методики расчета электромагнитных параметров при возникновении объемных резонансов в коаксиальной ячейке. В рассматриваемом диапазоне частот диэлектрическая проницаемость должна быть постоянна.

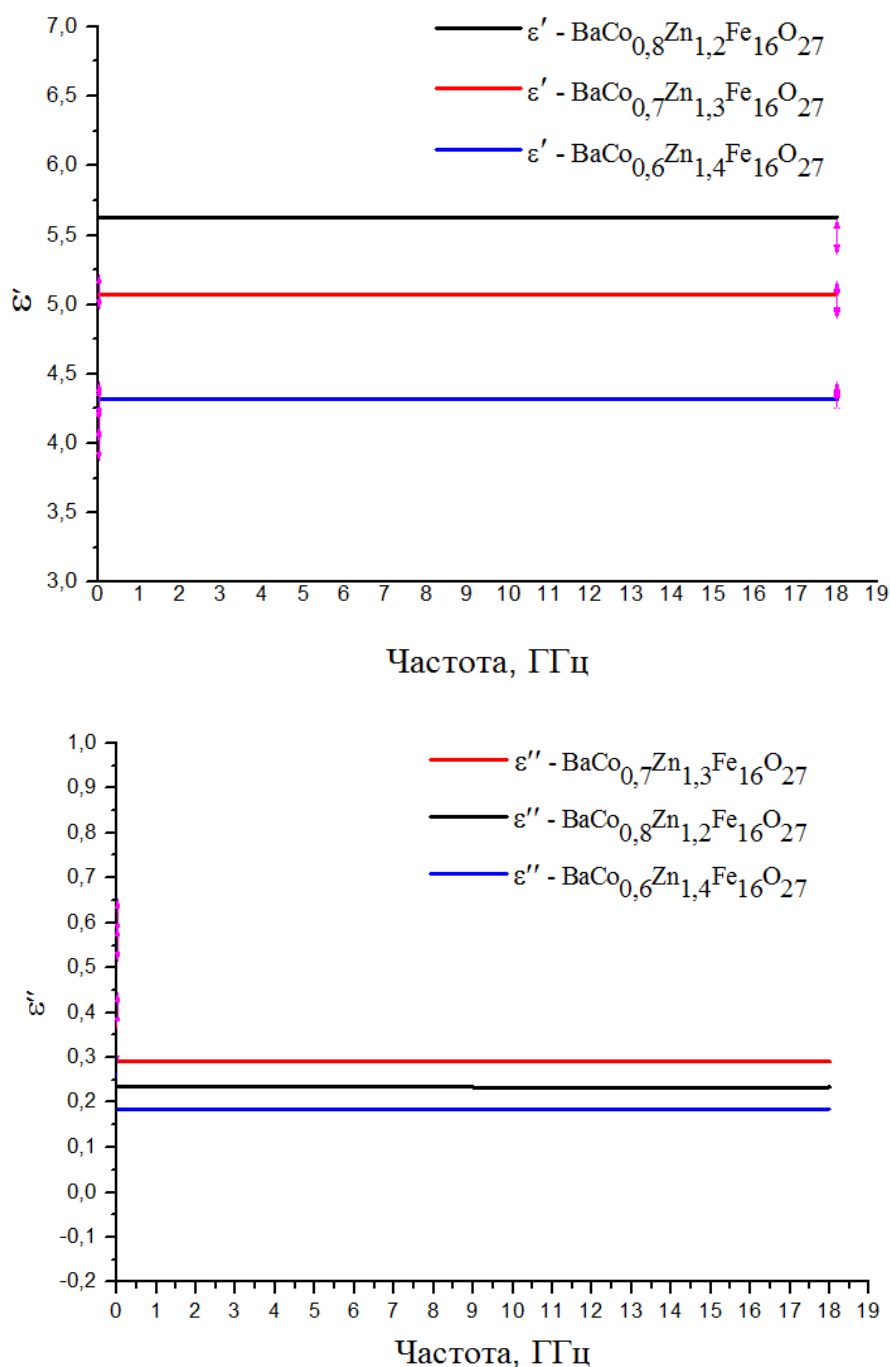


Рисунок 38 – Действительная и мнимая части диэлектрической проницаемости

На рисунке 39 изображены результаты расчета мнимой и действительной частей магнитной проницаемости. Глядя на графики, можно сказать, что значения μ' лежат в диапазоне 0,5–4,5, значения μ'' лежат в диапазоне 0,2–1,4. На обоих графиках можно наблюдать естественный ферромагнитный резонанс. На экспериментальных кривых образца $\text{BaCo}_{0,7}\text{Zn}_{1,3}\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ так же можно наблюдать волновой процесс, природе которого рассмотрим в дальнейших исследованиях.

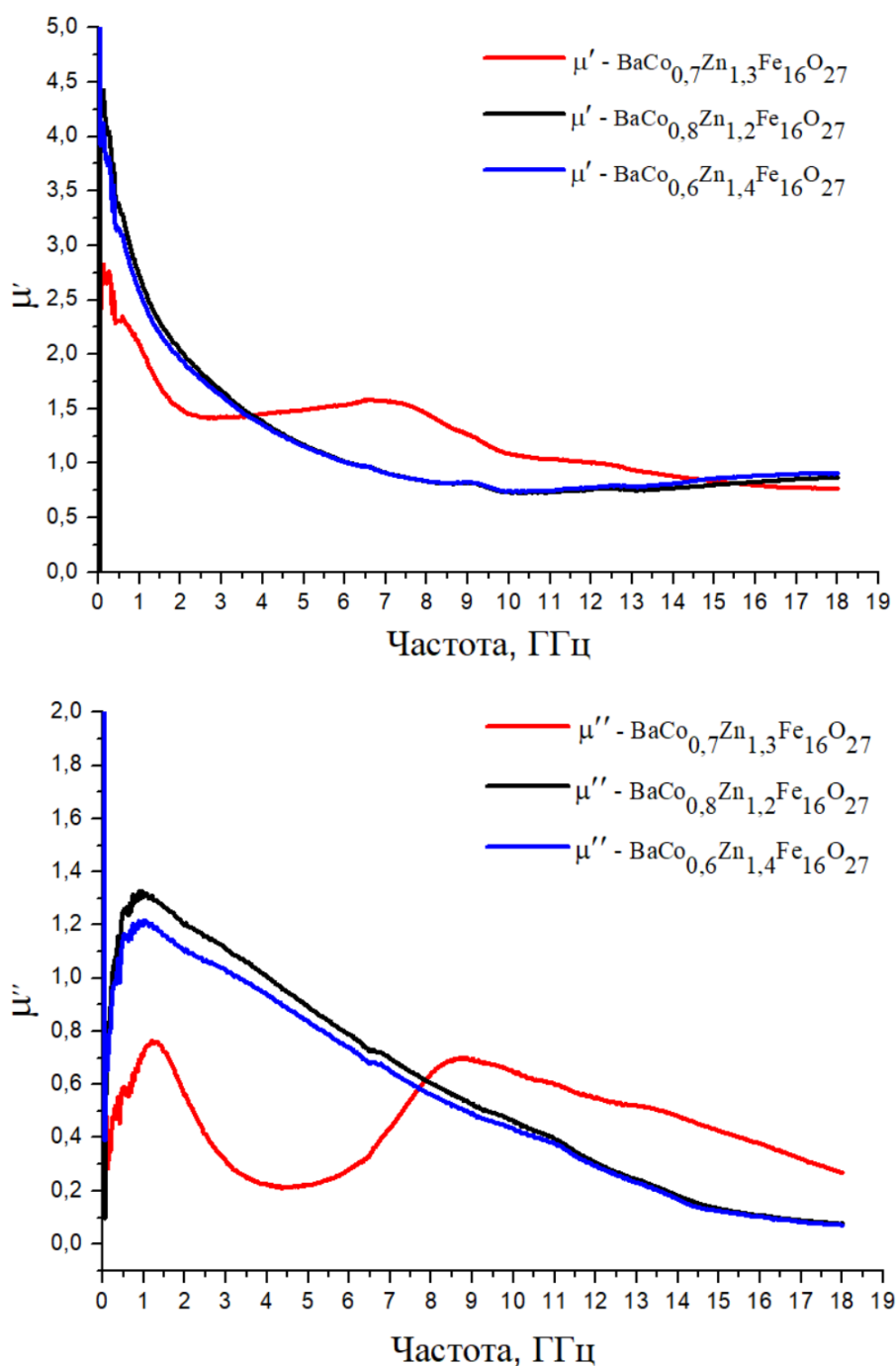


Рисунок 39 – Действительная и мнимая части магнитной проницаемости

Далее проведем сравнительный анализ результатов измерения электромагнитных характеристик сплошного феррита W-типа $\text{BaCoZnFe}_{16}\text{O}_{27}$ и композита с содержанием 80% феррита с аналогичной химической формулой. Однако толщина сплошного материала составляет 1,5 мм, а композита 2,25 мм. На рисунке 40 представлены частотные зависимости коэффициентов T и R .

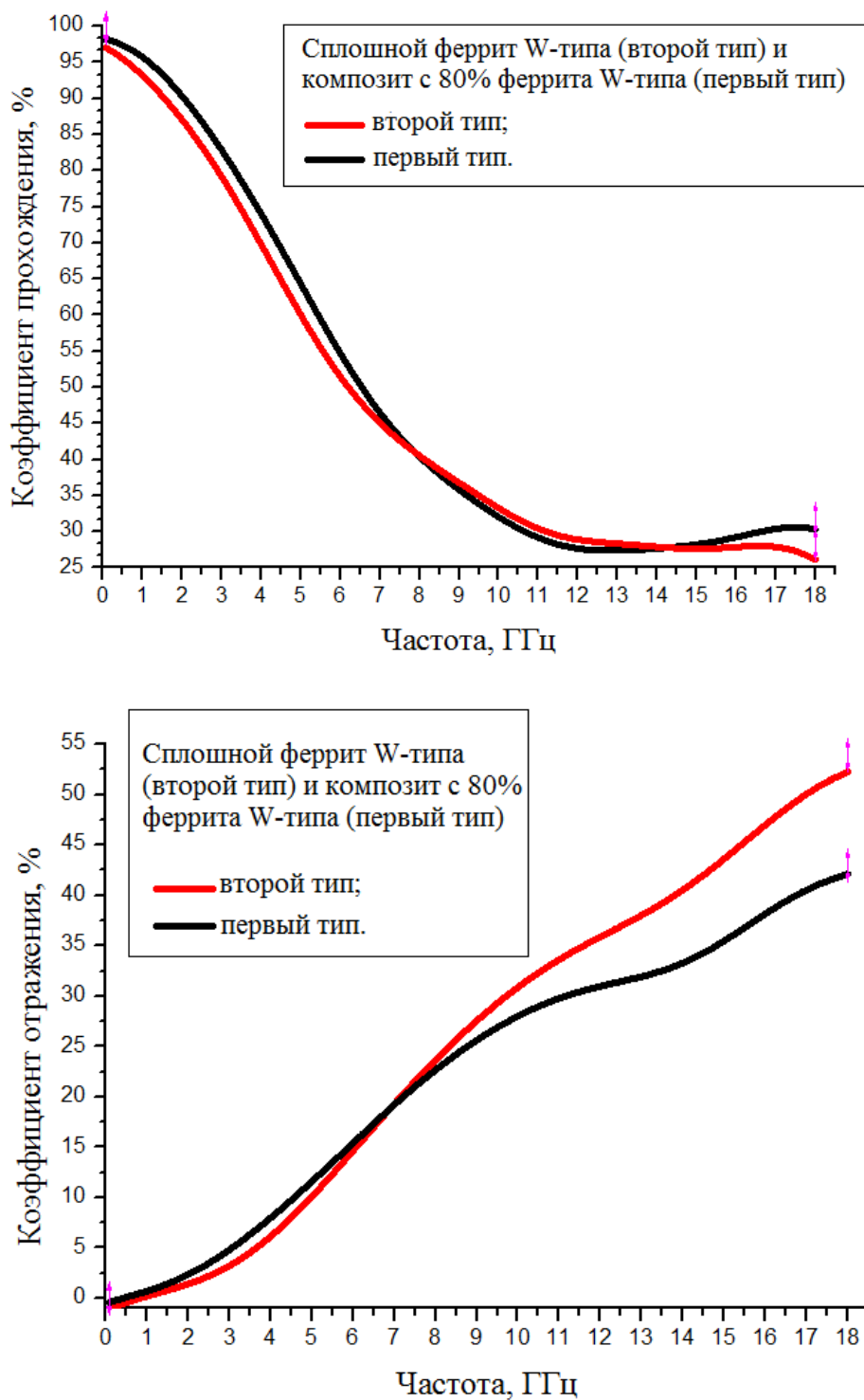


Рисунок 40 – Коэффициенты отражения и прохождения

Глядя на эти графики, можно сказать, что с ростом частоты коэффициенты прохождения образцов убывают, а коэффициенты отражения, соответственно, возрастают.

Коэффициенты прохождения данных образцов имеют почти одинаковые значения во всей полосе частот, однако стоит заметить, что коэффициент у сплошного образца меньше на 3-4 % в полосе частот от 0 до 7 ГГц, что связано с меньшей толщиной.

Коэффициенты отражения возрастают на всем диапазоне частот. До 5 ГГц данный коэффициент больше у композита примерно на 5 процентов. После 5 ГГц и до верхней границы полосы частот коэффициент отражения сплошного феррита преобладает на 7–10 процентов. Это подтверждает то, что плотность сплошного феррита выше, чем у композита, соответственно выше и отражающая способность.

По частотной зависимости коэффициента поглощения, изображенной на рисунке 41 видно, что максимальное значение коэффициента поглощения у композита составляет 42 % на частоте 13 ГГц, у сплошного феррита максимум коэффициента составляет 35 % на частоте 11 ГГц. После этих показателей коэффициенты поглощения образцов падают, и в конце диапазона составляют 27 % и 20 % у композита и сплошного феррита соответственно.

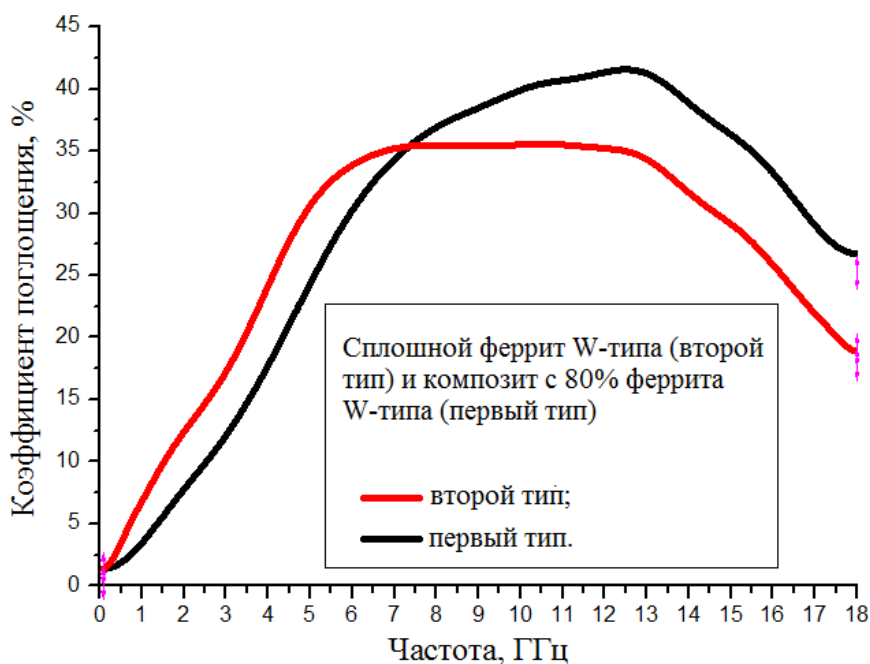


Рисунок 41 – Коэффициент поглощения

Далее рассмотрим частотные зависимости комплексных диэлектрических и магнитных проницаемостей, представленные на рисунке 42.

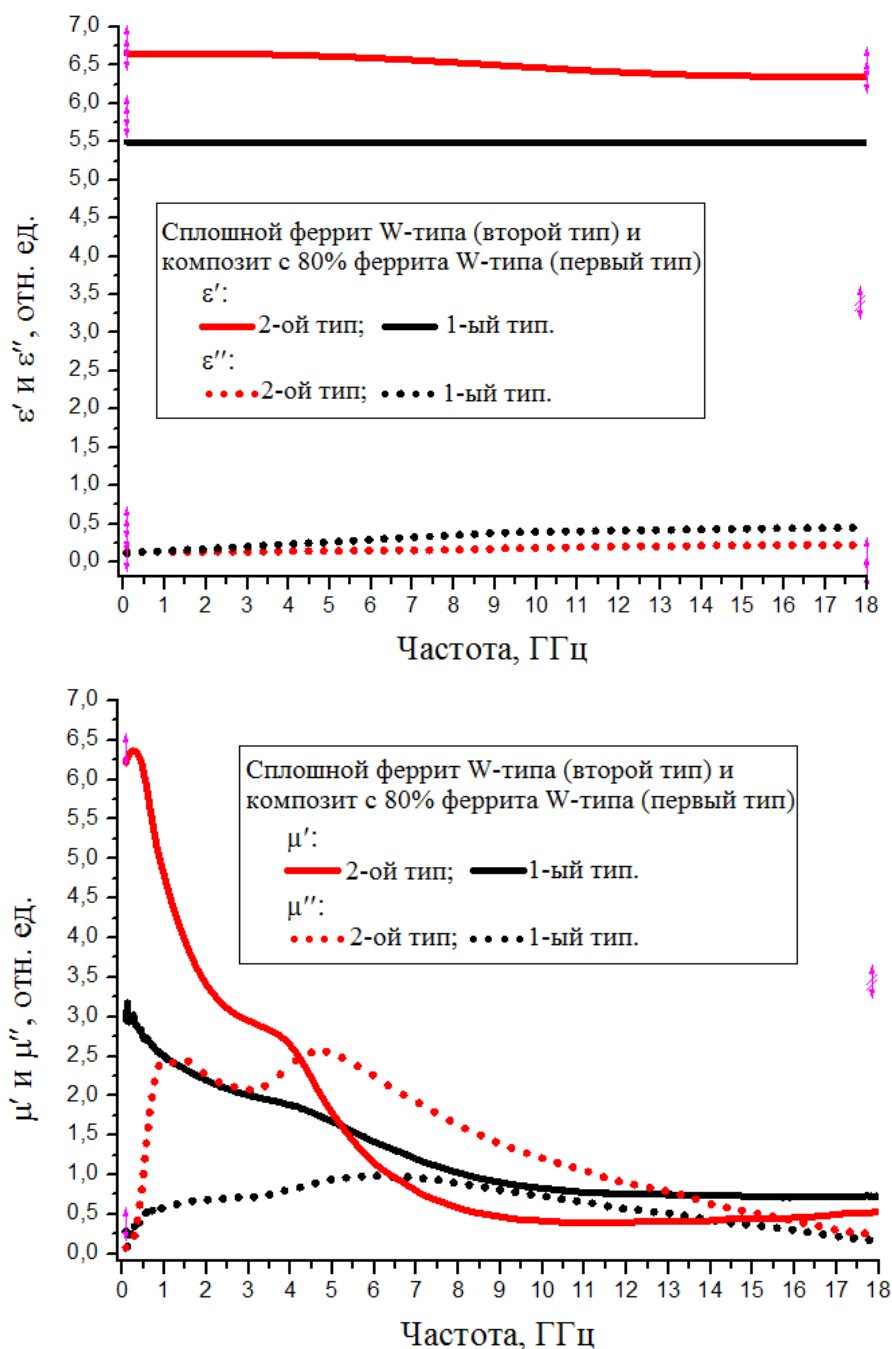


Рисунок 42 – Комплексные магнитная и диэлектрическая проницаемости

Диэлектрическая проницаемость принимает постоянные значения на всем диапазоне частот. Действительная часть ДП сплошного феррита составляет 6,5 отн.ед. С измельчением сплошного феррита в порошок действительная часть ДП снизилась на 1 относительную единицу. Мнимая часть же наоборот возросла

примерно на 0,2 отн.ед., то есть возросли потери энергии в веществе. Вероятнее всего, это связано с особенностями частиц, которые подвергались измельчению.

Глядя на зависимость МП от частоты можно сказать, что первый максимум действительной части сплошного феррита (в районе 1 ГГц) объясняется резонансом доменных границ. Второй максимум (в районе 4,5 ГГц) объясняется наличием естественного ферромагнитного резонанса. В этой области действительная и мнимая части МП совпадают и равны 2,5 отн.ед. Именно на этих частотах данный материал целесообразней всего использовать как поглотитель.

У композита резонанс доменных границ находится примерно на той же частоте, что и у сплошного, а вот область ЕФМР сдвинулась в район 8 ГГц и расширилась, это связано непосредственно с измельчением сплошного материала в порошок и увеличением анизотропии. Это является типичной картиной для подобных экспериментов. После ЕФМР вверх по частоте значение магнитной проницаемости уменьшается. Это связано с тем, что с последующим ростом частоты магнитные моменты уже не успевают поворачиваться за внешним магнитным полем.

Далее рассмотрим результаты измерения электромагнитных характеристик композитов на основе двух ферритов структуры шпинели отечественного и зарубежного производства и проведем их сравнительный анализ.

Анализируя график частотной зависимости коэффициента отражения, изображенный на рисунке 43, можно заметить, что с ростом частоты коэффициент отражения возрастает. На всем диапазоне частот наибольшим коэффициентом отражения обладает образец на основе феррита М400НН, и на максимальной частоте коэффициент отражения данного образца отличается от коэффициента отражения образца на основе корейского феррита почти на 10 %.

Коэффициент прохождения (рисунок 44), соответственно, с ростом частоты уменьшается. Наибольшим коэффициентом прохождения обладает композит на основе корейского феррита, на частоте 18 ГГц он равен 55 %.

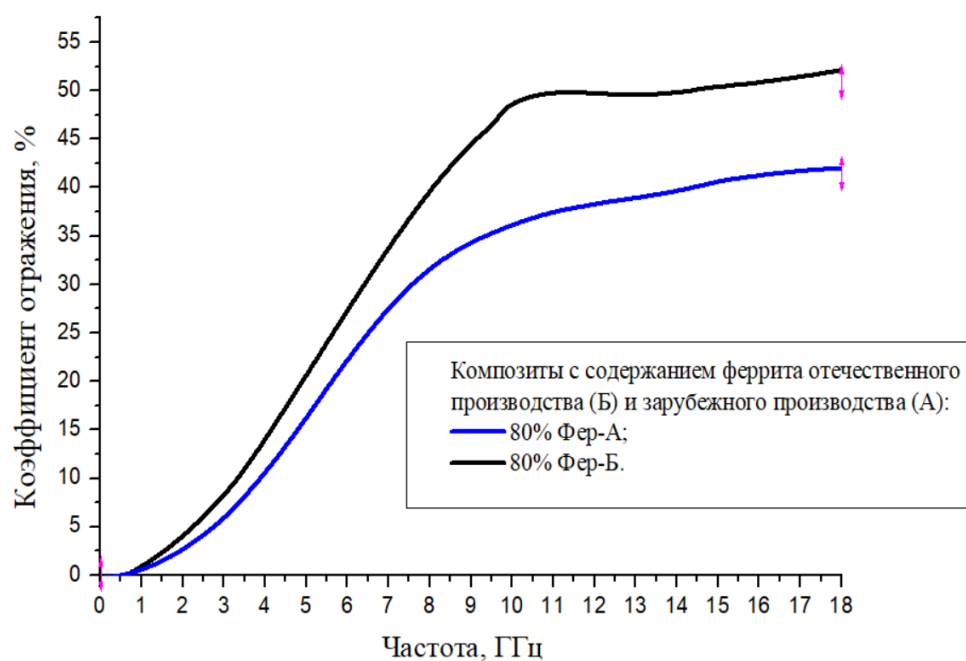


Рисунок 43 – Коэффициент отражения

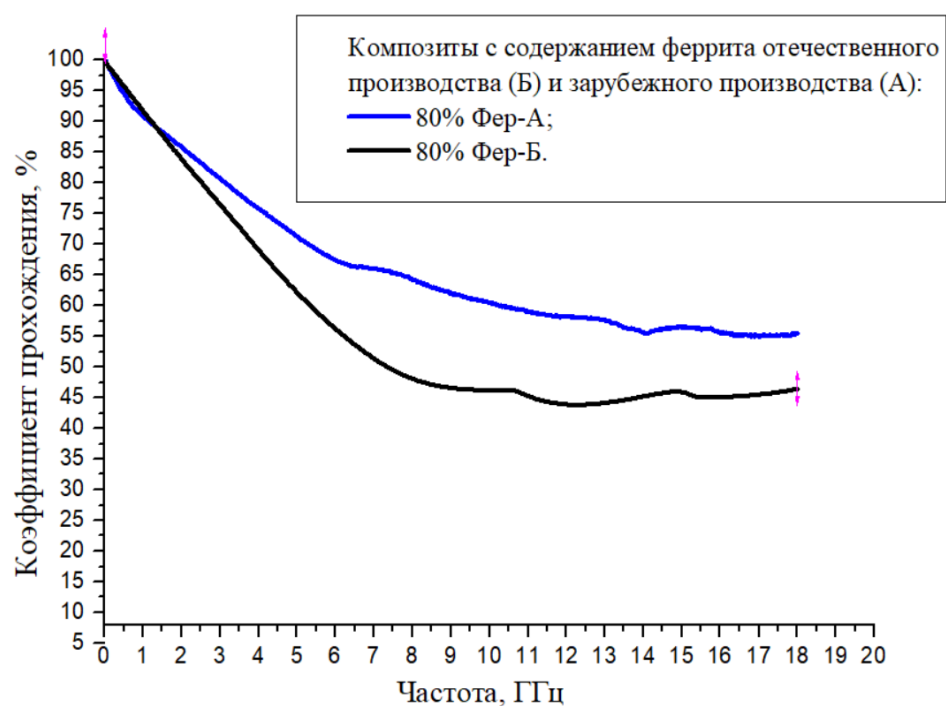


Рисунок 44 – Коэффициент прохождения

На графике зависимости коэффициента поглощения от частоты пропускаемого излучения (рисунок 45) можно заметить, что наибольшим коэффициентом поглощения обладает образец на основе феррита М400НН, на частоте 5 ГГц его значение достигает 18 %. У зарубежного феррита наибольший коэффициент поглощения

наблюдается на частоте 4 ГГц. Данные пики коэффициента поглощения и его последующее снижение у обоих образцов объясняются тем, что в районе этих частот четверть длины волны пропускаемого излучения равна электрической ширине образцов.

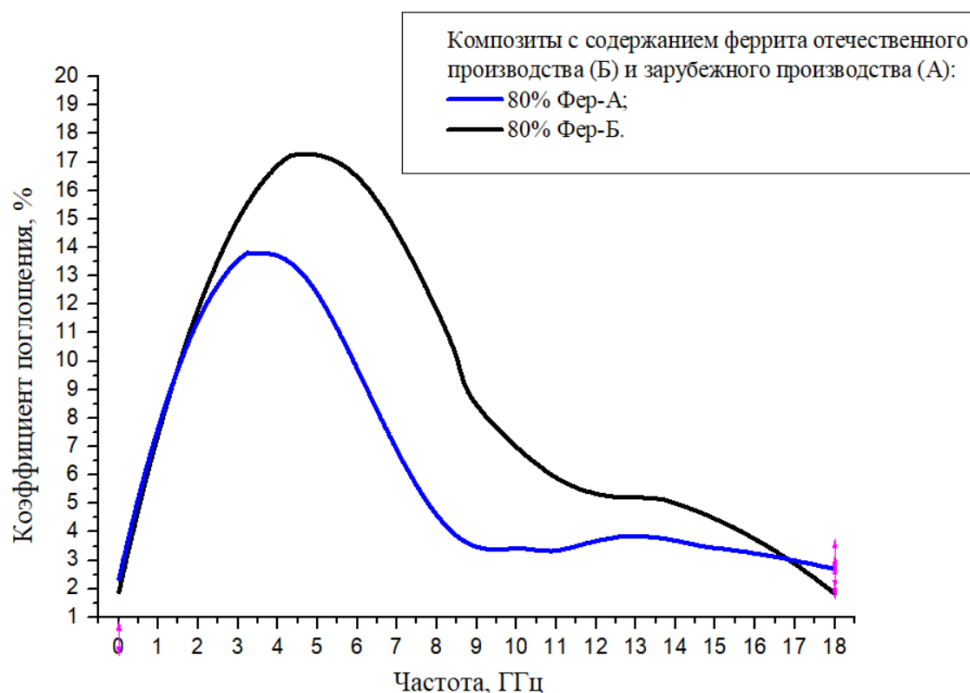


Рисунок 45 – Коэффициент поглощения

Глядя на график зависимости диэлектрической проницаемости композитов на основе ферритов отечественного и зарубежного производства от частоты (рисунок 46), можно заметить, что значения мнимой части ДП данных образцов почти не отличаются, и на всем диапазоне частот равны примерно 0,1 отн.ед. Значения действительной части ДП различны, у корейского образца – 4,8 отн.ед., у российского образца – 6,1 отн.ед., это означает, что образец на основе феррита марки М400НН обладает наибольшей степенью поляризации.

Анализируя график зависимости магнитной проницаемости от частоты, так же изображенный на рисунке 46, можно сказать, что мнимая и действительная части магнитной проницаемости данных образцов существенно не различаются, и что у исследуемых материалов в рассматриваемом диапазоне частот имеется естественный ферромагнитный резонанс (ЕФМР). Это область где действительная часть МП

снижается, а мнимая имеет максимум. У зарубежного феррита область ЕФМР находится в районе 400 МГц, а у отечественного в районе 700 МГц. Большими магнитными потерями и поглощающей способностью на частотах от 200 до 700 МГц обладает ферритовый материал А, а от 800 МГц и до 10 ГГц ферритовый материал Б.

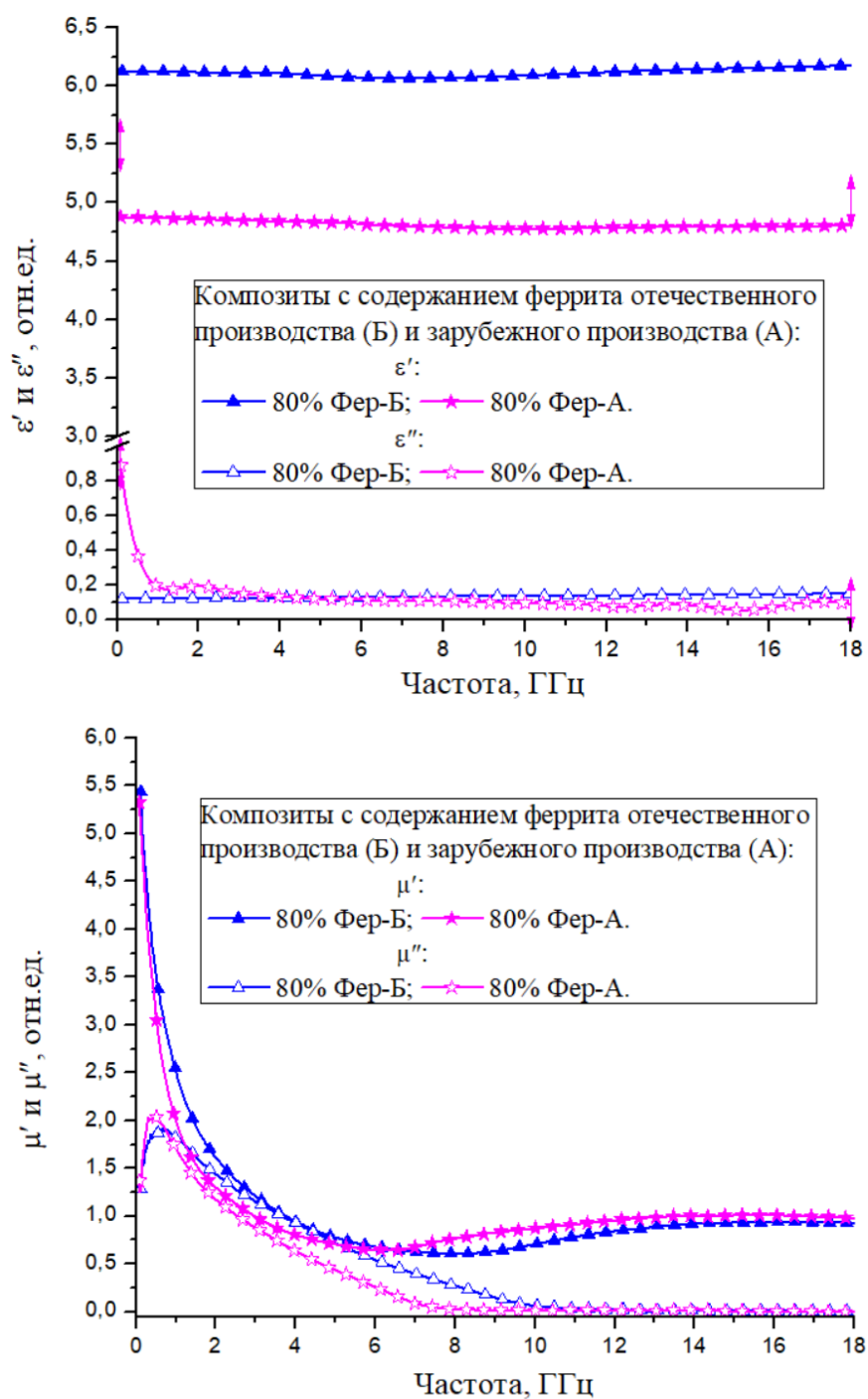


Рисунок 46 – Комплексные магнитная и диэлектрическая проницаемости

Следующим этапом научной работы стало моделирование измерения коэффициентов отражения, прохождения и поглощения на основе посчитанных ранее данных диэлектрической и магнитной проницаемостей с помощью программы, написанной в среде Mathcad моим научным руководителем. В этой программе есть возможность выбирать любые диапазоны толщины образца.

На рисунке 47 изображена зависимость коэффициента прохождения композитов на основе ферритов российского и корейского производства от частоты и толщины измеряемого образца.

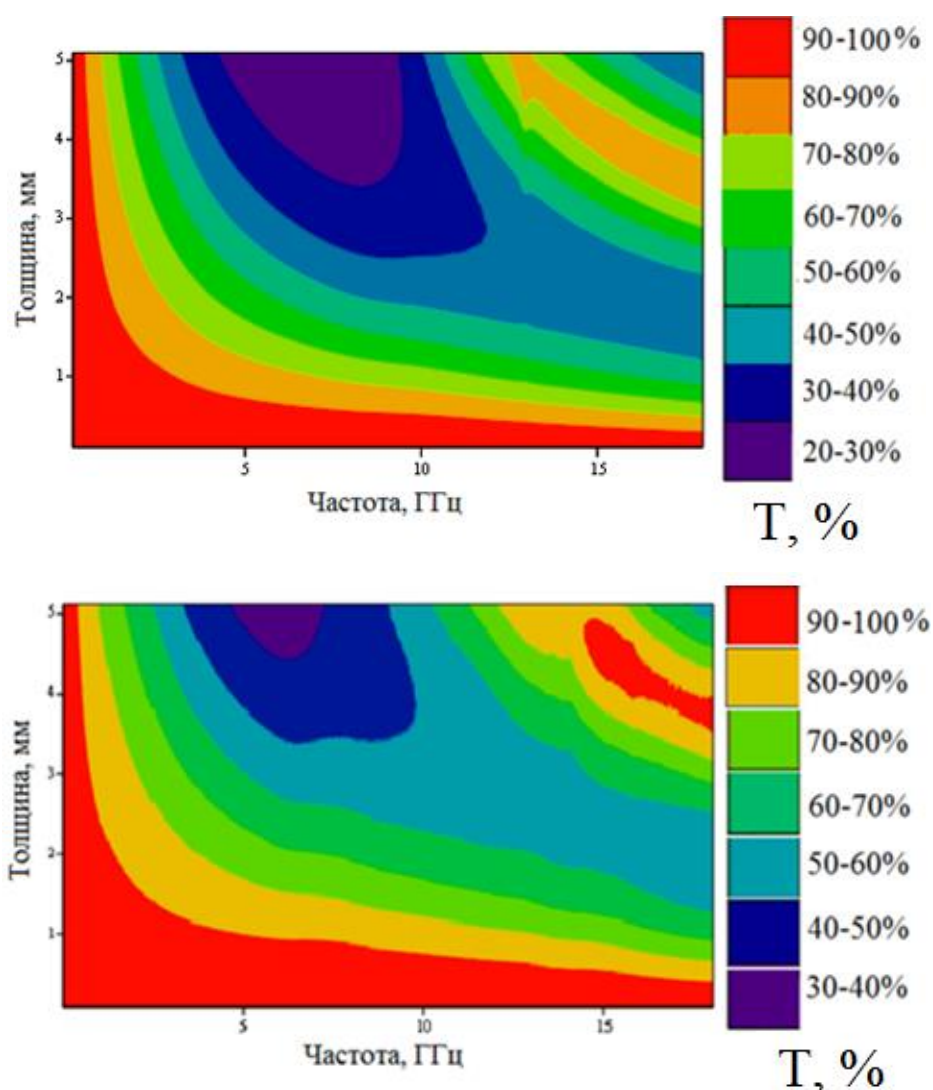


Рисунок 47 – Зависимость коэффициента прохождения от частоты и толщины образца в свободном пространстве для композита на основе феррита отечественного производства (сверху); композита на основе феррита корейского производства (снизу)

Видно, что с увеличением толщины образцов уменьшается доля проходящей мощности. У образца российского производства область самых минимальных значений коэффициента прохождения (менее 20 %) наблюдается в диапазоне частот от 5 ГГц до 9 ГГц при толщине образца от 3,5 мм и больше. У зарубежного образца эта область (менее 30 %) находится в диапазоне частот от 5 ГГц до 7 ГГц при толщине образца от 4,5 мм и больше.

На рисунке 48 изображена зависимость коэффициента отражения от частоты и толщины измеряемых образцов.

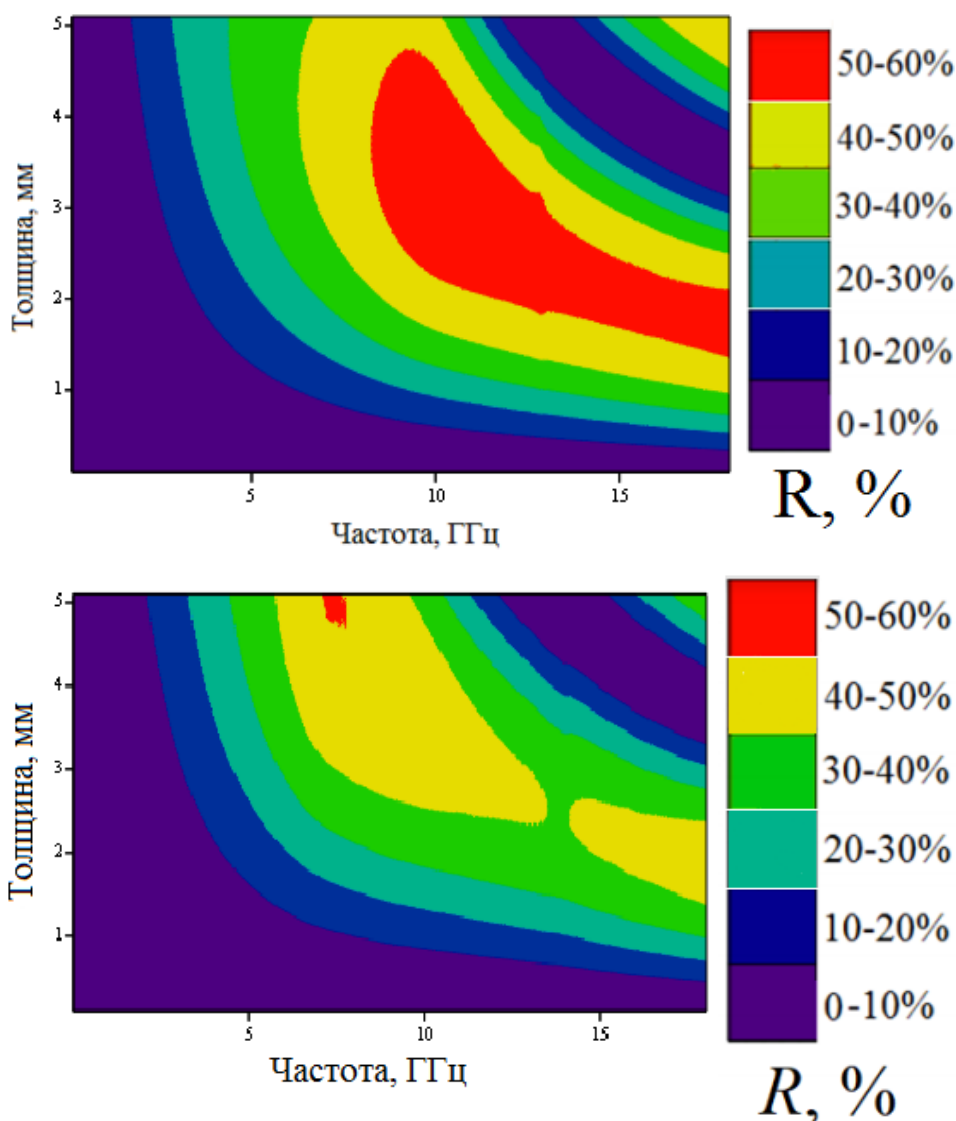


Рисунок 48 – Зависимость коэффициента отражения от частоты и толщины образца в свободном пространстве для композита на основе феррита отечественного производства (сверху); композита на основе феррита корейского производства (снизу)

Доля отраженной от образцов мощности соответственно возрастает с увеличением толщины образца. У композита на основе феррита российского производства область самых максимальных значений коэффициента отражения (60 %) наблюдается в диапазоне частот 9–18 ГГц при толщине образца 2–4,5 мм. У композита на основе феррита зарубежного производства эта область составляет 50 %, но находится примерно в тех же диапазонах (и по частоте, и по толщине образца). Коэффициент отражения 60 % у этого образца находится в узком диапазоне частот примерно 7–8 ГГц при толщине 4,5 мм и больше.

На рисунке 49 изображен коэффициент поглощения.

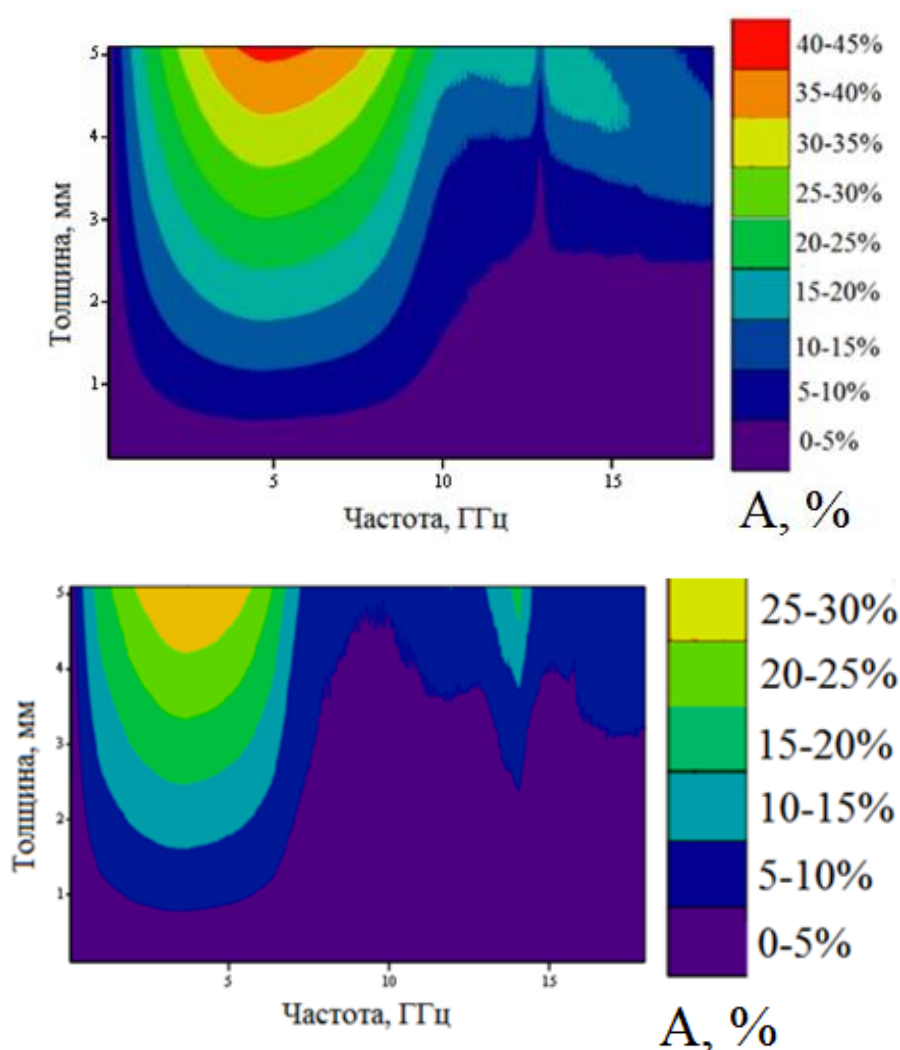


Рисунок 49 – Зависимость коэффициента поглощения от частоты и толщины образца в свободном пространстве для композита на основе феррита отечественного производства (сверху); композита на основе феррита корейского производства (снизу)

У российского композита область максимального поглощения излучаемой мощности (40 %) наблюдается в диапазоне частот 3–7 ГГц при толщине образца от 4,5 мм и выше. У композита на основе феррита зарубежного производства область максимальных значений коэффициента поглощения составляет 30 % и находится примерно в том же диапазоне, но немного сжата по частоте. Отсюда понятно, что российский образец показал лучшую поглощающую способность.

Моделирование измерения коэффициента отражения образца на металле (рисунок 50) имеет наибольшее значение, чем в свободном пространстве, потому что, как уже было сказано ранее, в составе безэховых камер феррит располагается на металлической подложке.

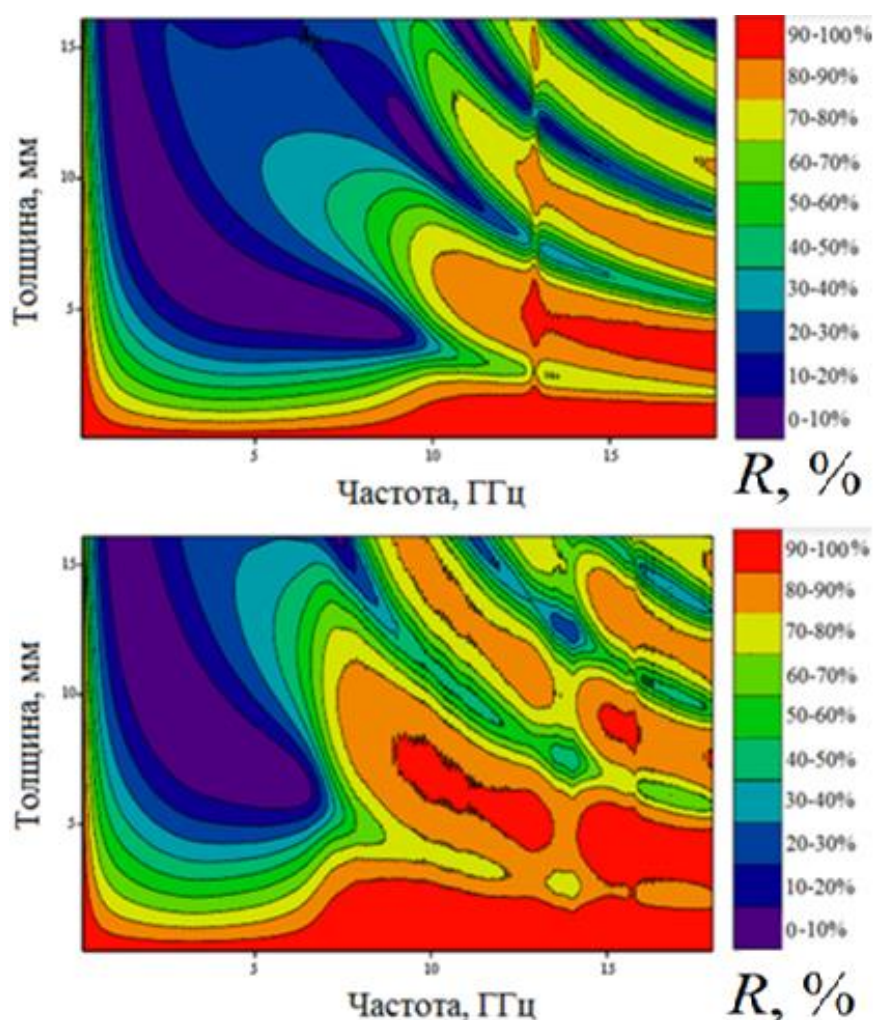


Рисунок 50 - Зависимость коэффициента отражения от частоты и толщины образца, измеряемого на металле для композита на основе феррита отечественного производства (сверху); композита на основе феррита корейского производства (снизу)

Так как при измерениях в безэховой камере важно, чтобы сигнал не вернулся к объекту, а поглотился в стенках камеры, опираясь на данные графики можно установить факт, что российский образец в безэховой камере целесообразней использовать до 10 ГГц при толщине свыше 5 мм, так как именно в этом диапазоне находится область минимального отражения и максимального поглощения излучаемой мощности (фиолетовая область на графике). У зарубежного образца этот предел сдвинут примерно до 7 ГГц.

Далее проведем сравнительный анализ результатов измерения ЭМ характеристик экспериментальных образцов второго типа.

На рисунке 51 представлены графики зависимости коэффициентов отражения, прохождения и поглощения от частоты, цельного феррита отечественного производства марки М400НН и аналогичного феррита корейского производства.

Коэффициенты отражения возрастают на всем диапазоне частот. На верхней границе полосы частот от образцов отражается около 53 % излучения. До 10 ГГц коэффициент отражения зарубежного феррита больше чем у российского на 2,5 %, а в полосе частот 13–18 ГГц на 2,5 % больше становится коэффициент отражения феррита отечественного производства.

Наибольшим коэффициентом прохождения на всем диапазоне частот обладает феррит зарубежного производства. Разница между значениями коэффициентов прохождения образцов колеблется от 1 % до 8 %.

Максимальным значением коэффициента поглощения (21 %) обладает феррит отечественного производства на частоте 1 ГГц. Значение коэффициента поглощения зарубежного феррита на этой же частоте составляет 17 %. Максимальная разность коэффициентов поглощения образцов составляет 12 % на частоте 7 ГГц. В полосе частот 14–18 ГГц корейский феррит поглощает большую часть излучения, чем российский примерно на 1 %.

На рисунке 52 представлены частотные зависимости комплексных диэлектрических и магнитных проницаемостей данных образцов. Действительная часть ДП зарубежного феррита принимает значение 7 отн.ед., а у отечественного 6,5 отн.ед.

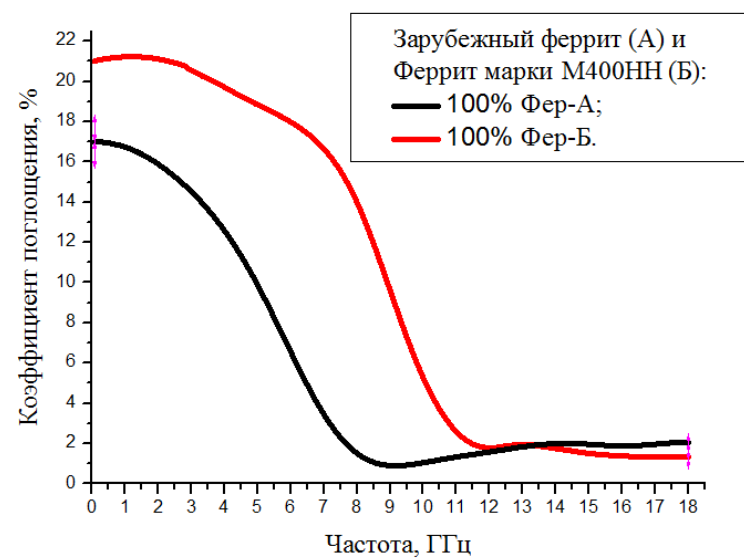
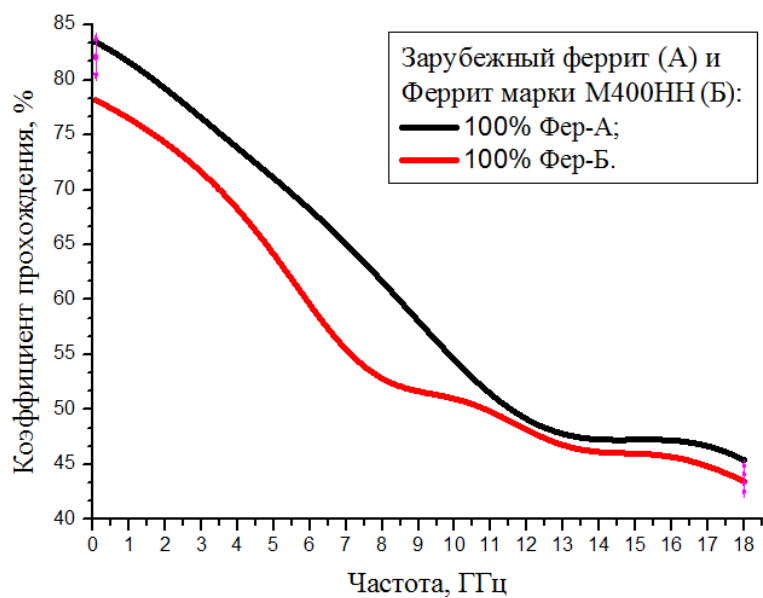
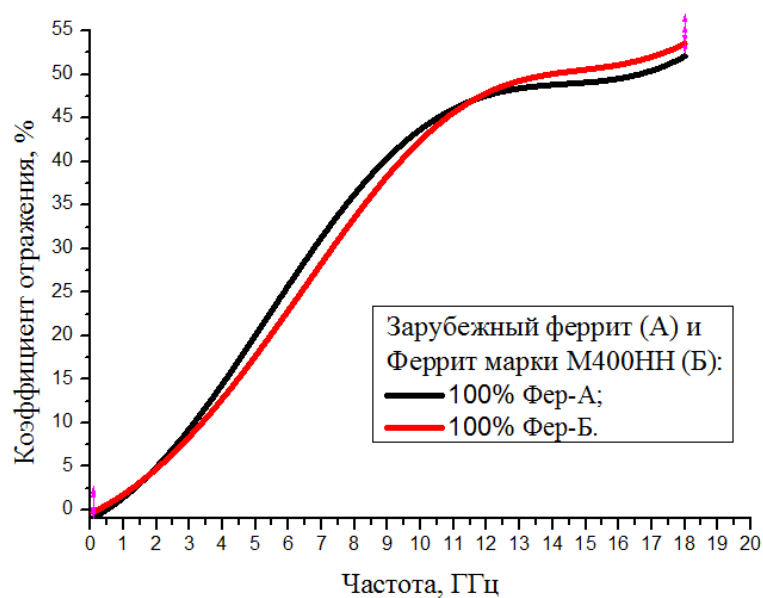


Рисунок 51 – Коэффициенты отражения, прохождения и поглощения

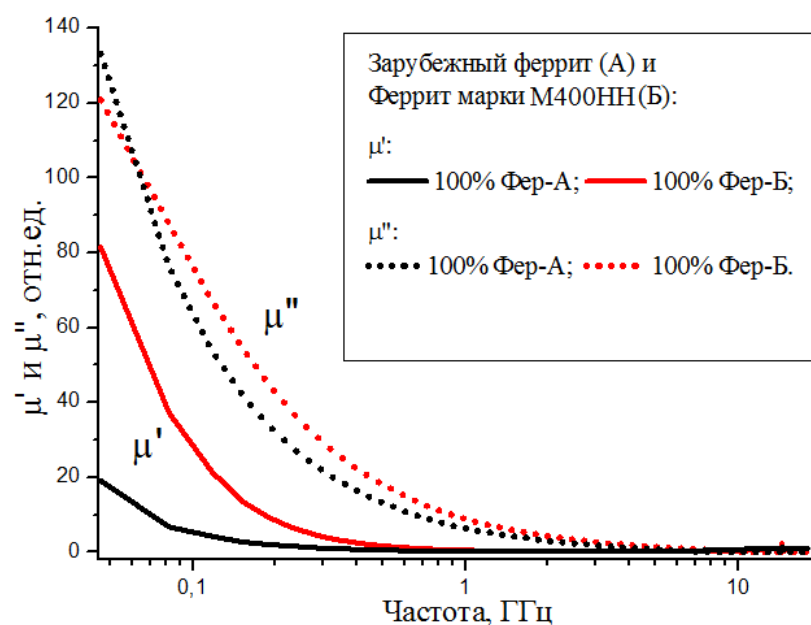
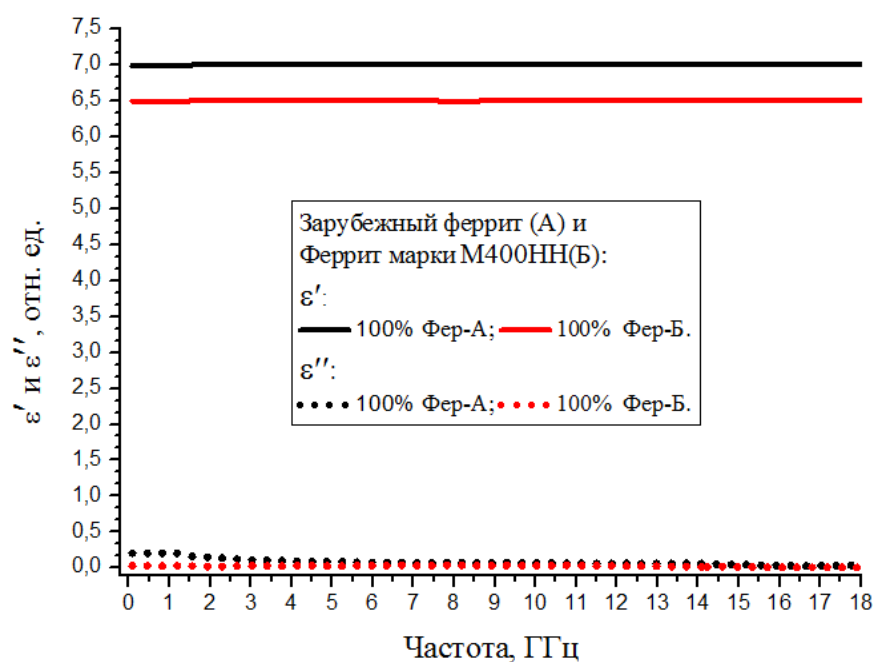


Рисунок 52 – Комплексные магнитная и диэлектрическая проницаемости

Действительная часть ДП зарубежного феррита принимает значение 7 отн.ед., а у отечественного 6,5 отн.ед.

Если сравнивать эти показатели с результатами измерения ДП композитов, то можно заметить, что после измельчения сплошного феррита отечественного производства, его действительная часть ДП изменилась не значительно (упала всего на 0,3 отн.ед.). Действительная часть ДП зарубежного феррита снизилась на 2,2 отн.ед. Вероятнее всего, это связано с различием технологий изготовления ферритов. Феррит зарубежного производства лучше спрессован, значит его

плотность выше чем у отечественного феррита. Поэтому после их измельчения плотность зарубежного феррита уменьшается значительно, чем плотность отечественного. Этим и объясняется такое сильное уменьшение значения действительной части ДП зарубежного образца по сравнению с отечественным.

Мнимая же часть ДП почти не изменилась после измельчения ферритов. В данном случае значения мнимой части ДП данных образцов равны и составляют около 0,1 отн.ед.

Глядя на график частотной зависимости комплексной магнитной проницаемости, можно заметить, что зарубежный феррит имеет меньшие магнитные потери, чем отечественный. Естественный ферромагнитный резонанс на этом графике не наблюдается, так как он располагается на более низких частотах.

Далее снова проведем моделирование измерения коэффициентов отражения, прохождения и поглощения, но уже сплошных образцов W-типа, зарубежного и отечественного образцов.

На рисунке 53 изображена зависимость коэффициента прохождения сплошных ферритов отечественного и зарубежного производства от частоты и толщины измеряемых образцов.

Видно, что с увеличением толщины образцов уменьшается доля проходящей мощности. У образца российского производства область самых минимальных значений коэффициента прохождения (менее 10 %) наблюдается в диапазоне частот от 5 ГГц до 10 ГГц при толщине образца от 3,5 мм и больше. У зарубежного образца эта область (менее 20 %) находится в диапазоне частот от 4 ГГц до 8 ГГц при толщине образца от 3,5 мм и больше.

На рисунке 54 изображена зависимость коэффициента отражения от частоты и толщины измеряемых образцов.

Доля отраженной от образцов мощности соответственно возрастает с увеличением толщины образца. У феррита российского производства область самых максимальных значений коэффициента отражения (менее 80 %) наблюдается в диапазоне частот 10–11,5 ГГц при толщине образца свыше 2,5 мм. У феррита зарубежного производства эта область находится в узком диапазоне частот примерно 7–9 ГГц при толщине 3,5 мм и больше.

Из графика зависимости коэффициента поглощения от толщины образца и частоты, изображенного на рисунке 55, видно, что у российского феррита область максимального поглощения излучаемой мощности (до 60 %) наблюдается в диапазоне частот 2–7 ГГц при толщине образца от 4 мм и выше. У феррита зарубежного производства область максимальных значений коэффициента поглощения составляет 45–50 % и находится в диапазоне 2–4 ГГц при толщине свыше 4,5 мм. Отсюда понятно, что российский образец показал лучшую поглощающую способность.

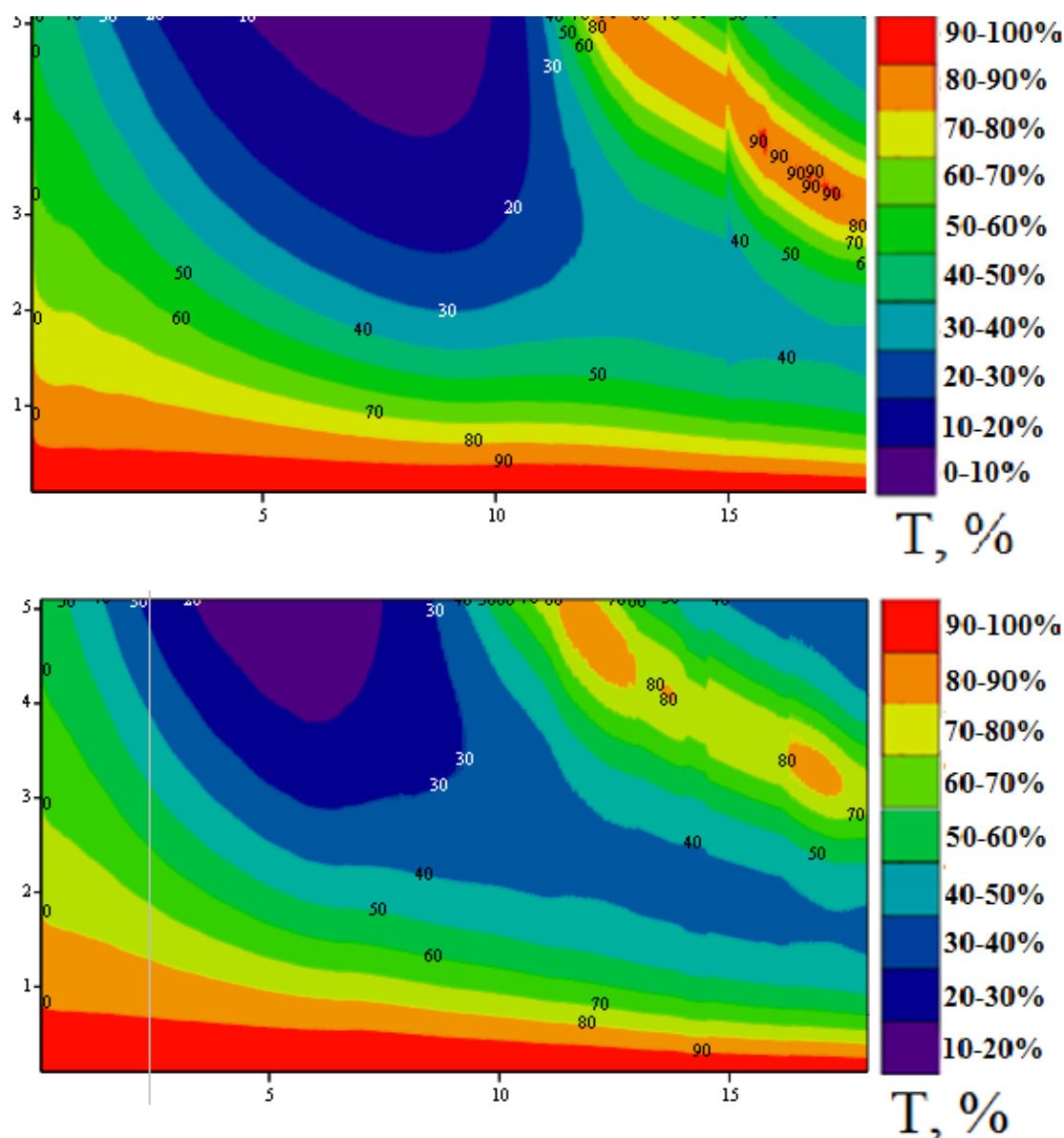


Рисунок 53 – Зависимость коэффициента прохождения от частоты и толщины образца в свободном пространстве для феррита отечественного производства (сверху); композита на основе феррита корейского производства (снизу)

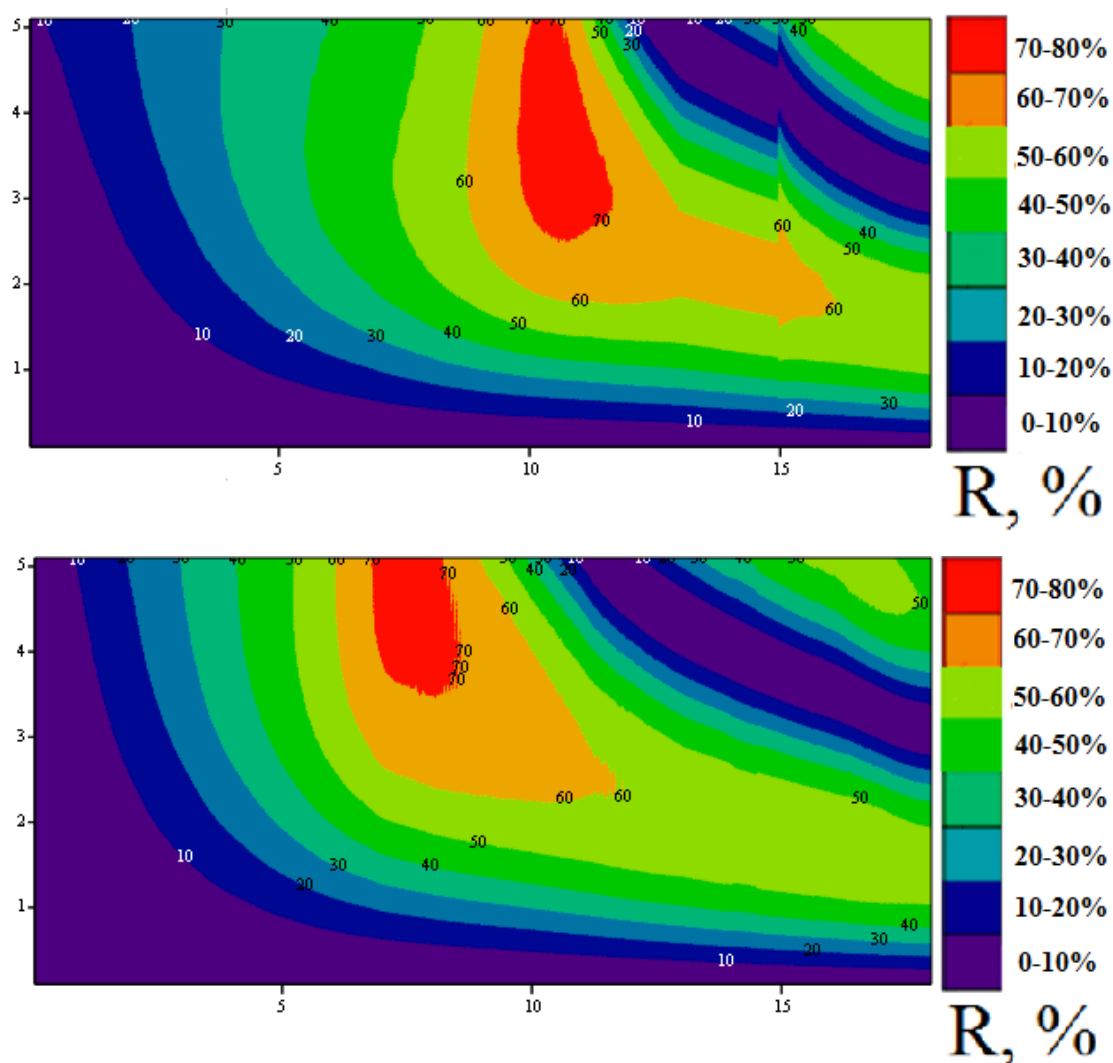


Рисунок 54 – Зависимость коэффициента отражения от частоты и толщины образца в свободном пространстве для феррита отечественного производства (сверху); композита на основе феррита корейского производства (снизу)

Далее рассмотрим результаты моделирования коэффициентов T , R , A феррита W -типа. На рисунке 56 изображен график зависимости коэффициента прохождения, отражения и поглощения от частоты и толщины образца в свободном пространстве для феррита W -типа. Область минимального прохождения излучения через образец, судя по графику, находится в диапазоне частот 5–18 ГГц при толщине образца свыше 3 мм.

Доля отраженной от образца мощности возрастает с увеличением частоты. До 5 ГГц увеличение толщины образца никак не влияет на коэффициент отражения, в этой области он постоянный и равен 0–10 %. Область максимального отражения (50–60 %) находится в узком диапазоне 17–18 ГГц при толщине 1–2,5 мм.

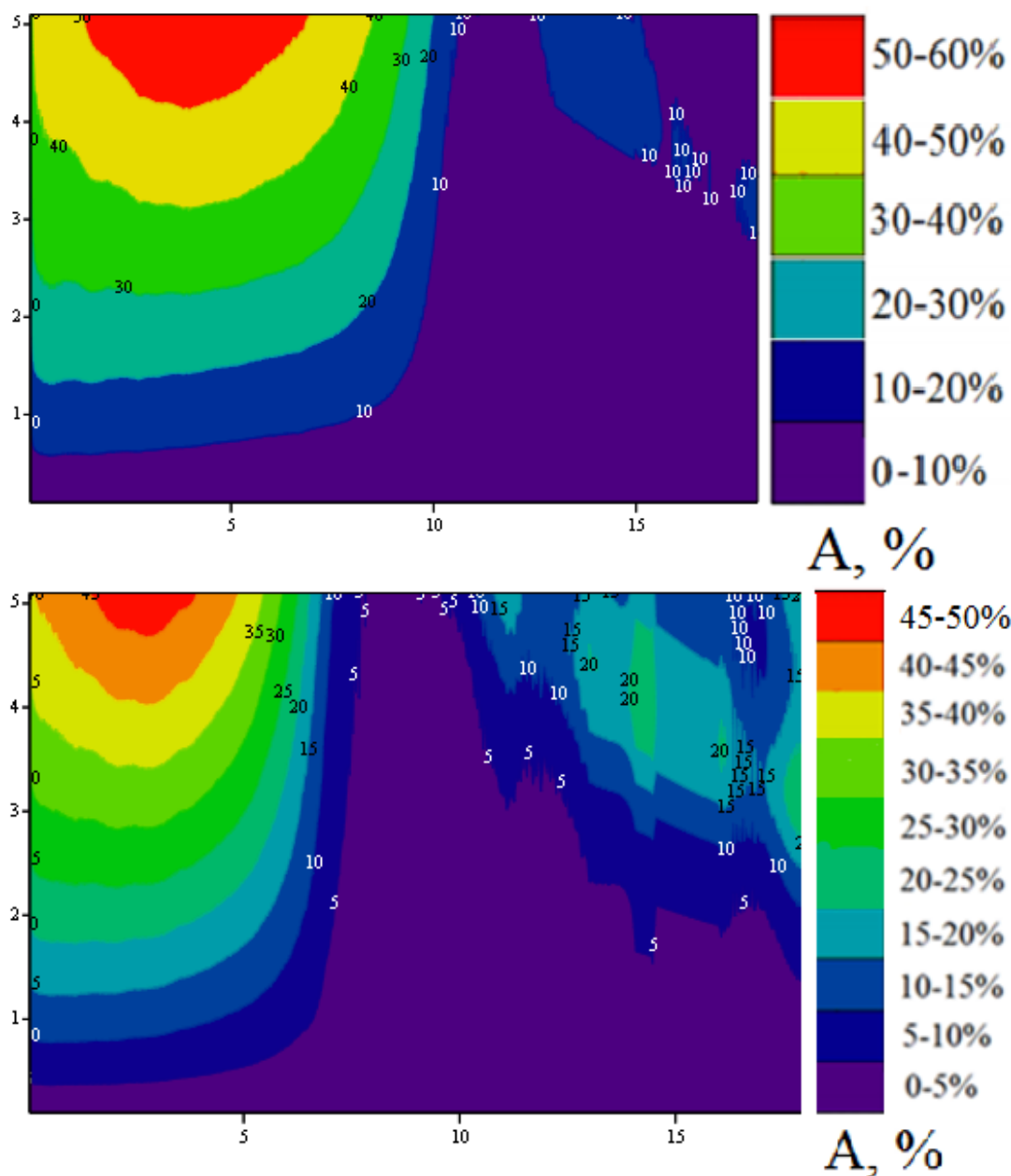


Рисунок 55 – Зависимость коэффициента поглощения от частоты и толщины образца в свободном пространстве для феррита отечественного производства (сверху); композита на основе феррита корейского производства (снизу)

Коэффициент поглощения возрастает с повышением толщины образца. Область максимального поглощения излучаемой мощности находится в диапазоне 5–15 ГГц при толщине образца свыше 3,5 мм.

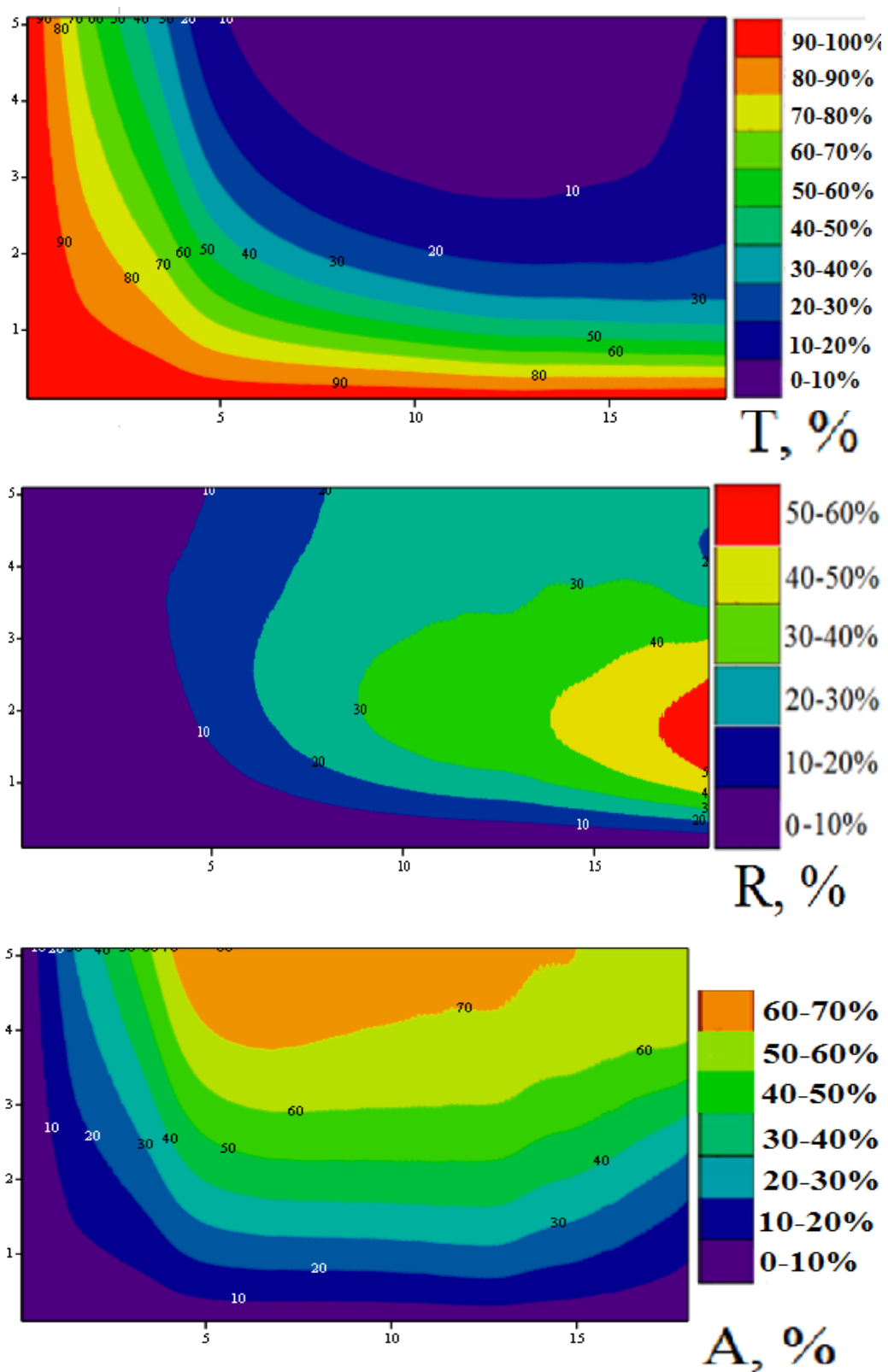


Рисунок 56 – Зависимость коэффициента прохождения, отражения и поглощения (сверху вниз соответственно) от частоты и толщины образца в свободном пространстве для феррита гексагонального феррита W-типа

Далее изучим результаты моделирования коэффициента отражения всех трех образцов на металле (рисунки 57 и 58). Диапазон толщины образца зададим 0,1–15 мм.

Так как при измерениях в безэховой камере важно, чтобы сигнал поглотился в стенках камеры, опираясь на данные графики можно установить факт, что российский образец в безэховой камере целесообразней использовать примерно до 8 ГГц при толщине свыше 3 мм, так как именно в этом диапазоне находится область минимального отражения и максимального поглощения излучаемой мощности. У зарубежного образца эта область находится примерно в том же диапазоне, но она уже по частоте и выше по толщине.

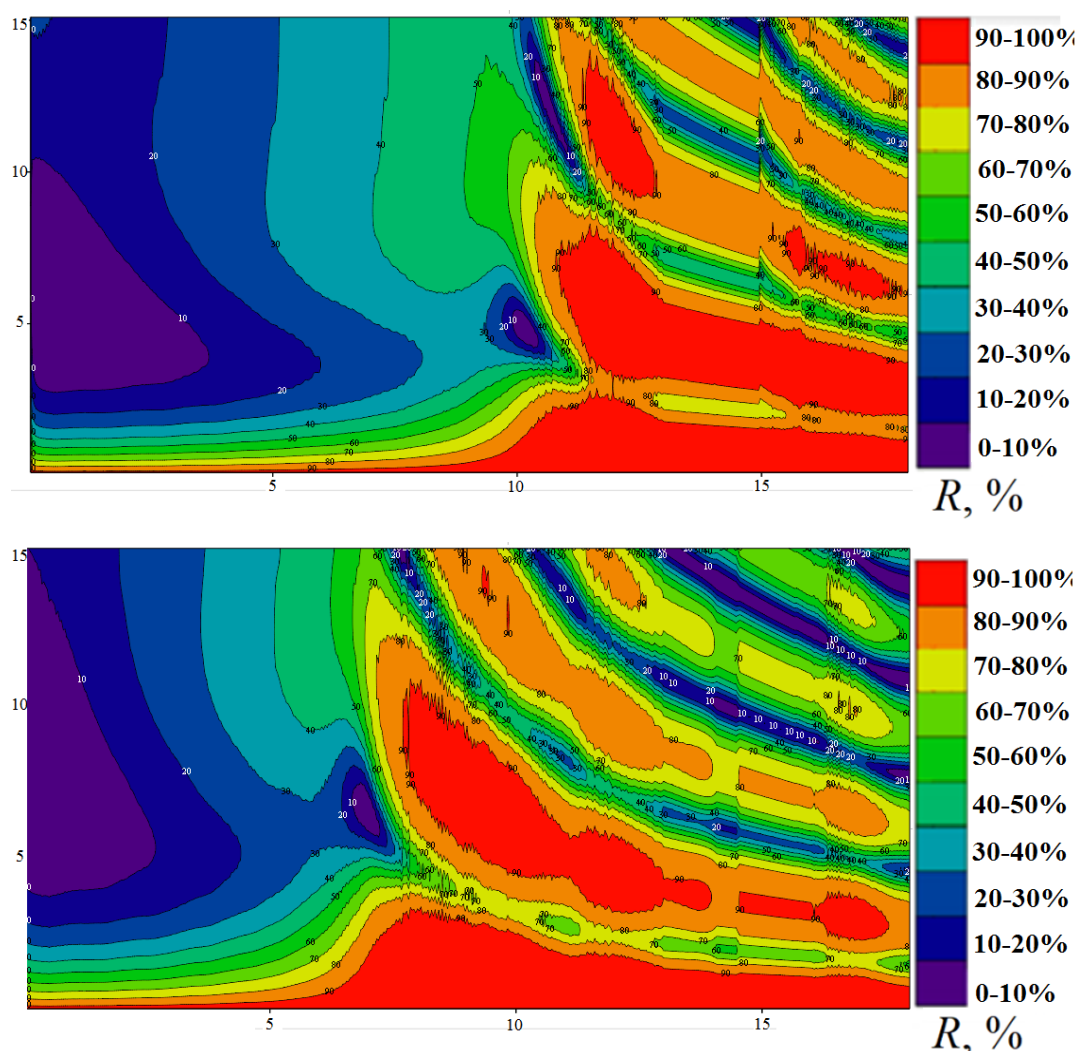


Рисунок 57 – Зависимость коэффициента отражения от частоты и толщины образца, измеряемого на металле для феррита отечественного производства (сверху); для феррита корейского производства (снизу)

По результатам моделирования можно сделать вывод, что феррит W-типа обладает отличной поглощающей способностью на металле. В качестве поглотителя его целесообразно использовать в диапазоне 4–18 ГГц при толщине порядка 2,5 мм.

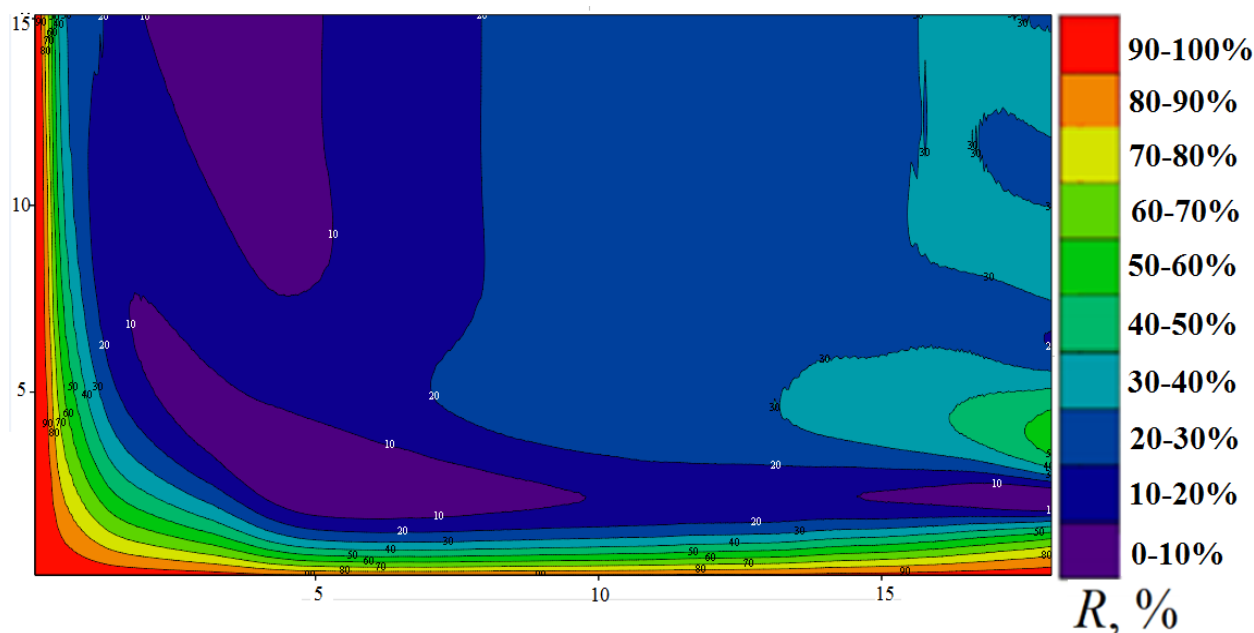


Рисунок 58 – Зависимость коэффициента отражения от частоты и толщины образца, измеряемого на металле для феррита W-типа

Заключительным этапом моей научной работы стало изготовление композитов с 80 % феррита W-типа, феррита М400НН и феррита зарубежного производства, а так же экспериментальный образец из цельного феррита М400НН для измерения в диапазоне частот 100-1000 ГГц.

Диэлектрическая проницаемость композитов на основе отечественного и зарубежного ферритов (рисунок 59) в данном диапазоне частот также принимает постоянные значения. Значения действительной части ДП у корейского образца – 4,6 отн. ед., у российского образца – 5 отн.ед., это означает, что образец на основе феррита марки М400НН обладает наибольшей степенью поляризации. Мнимая же часть данных образцов различается лишь на 0,2 отн. ед.

Действительная часть диэлектрической проницаемости композита на основе феррита W-типа (рисунок 60) постоянна на всем диапазоне частот и составляет 4,4 отн. ед., мнимая – 0,3 отн. ед.

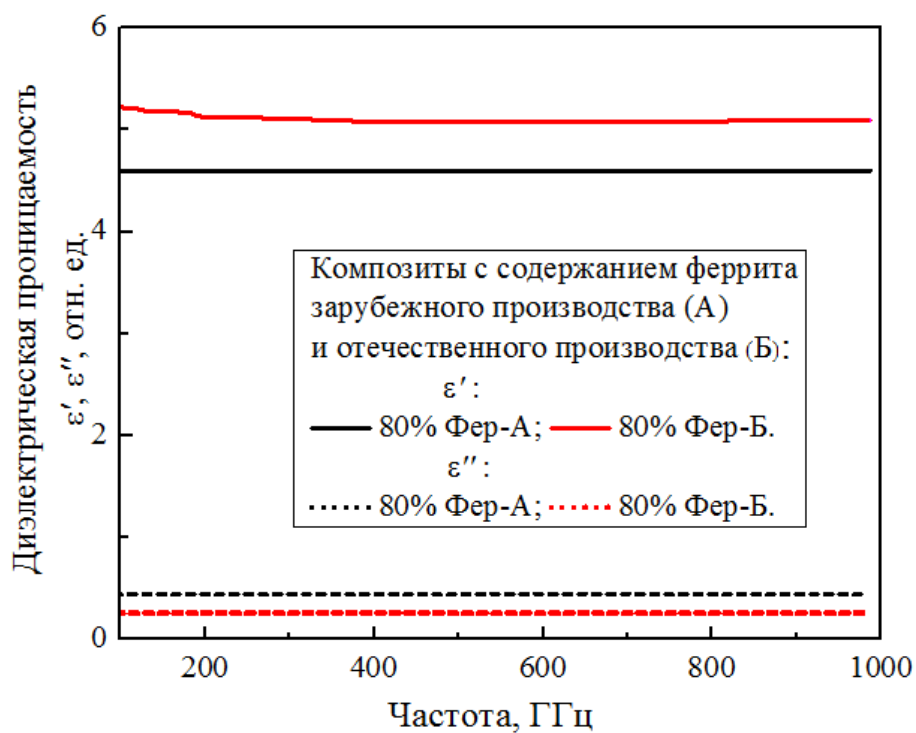


Рисунок 59 – Комплексная диэлектрическая проницаемость композитов на основе отечественного и зарубежного ферритов

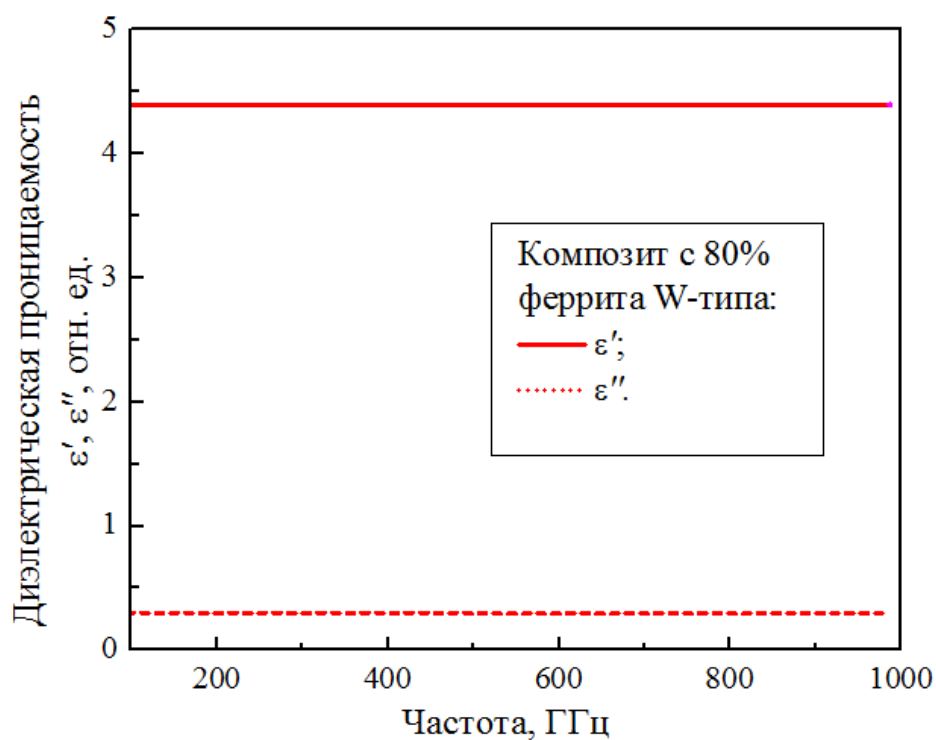


Рисунок 60 – Комплексная диэлектрическая проницаемость композита на основе феррита W-типа

На рисунке 61 изображен график зависимости комплексной ДП феррита отечественного производства от частоты подаваемого излучения. Действительная часть ДП на всем диапазоне частот принимает значение 13,5 отн. ед., мнимая – 0,1 отн. ед.

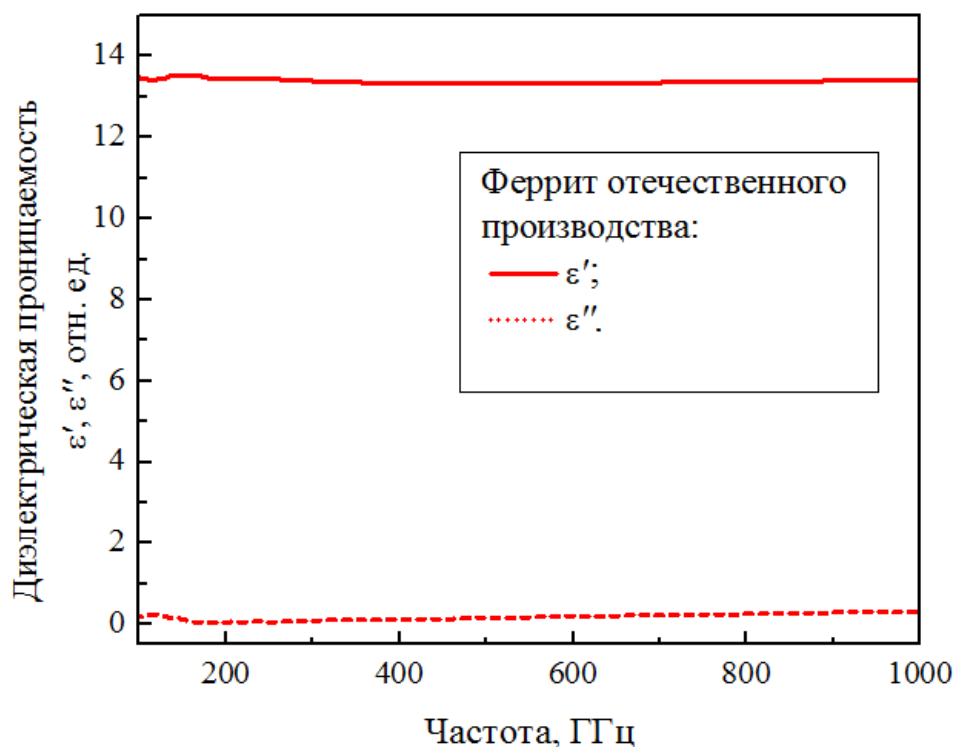


Рисунок 61 – Комплексная диэлектрическая проницаемость сплошного феррита М400НН

Далее сравним результаты моделирования коэффициентов отражения, прохождения и поглощения феррита М400НН и композита с содержанием 80 % этого феррита, на основе посчитанных ранее данных диэлектрической проницаемости. Толщину образца зададим от 0 до 1 мм.

На рисунке 62 изображена зависимость коэффициента прохождения от частоты и толщины измеряемых образцов.

Видно, что с увеличением толщины образцов и частоты уменьшается доля проходящей мощности. Область самых минимальных значений коэффициента прохождения (менее 10 %) в обоих случаях наблюдается в диапазоне частот от 400 ГГц до 1000 ГГц при толщине образца от 0,5 мм и больше.

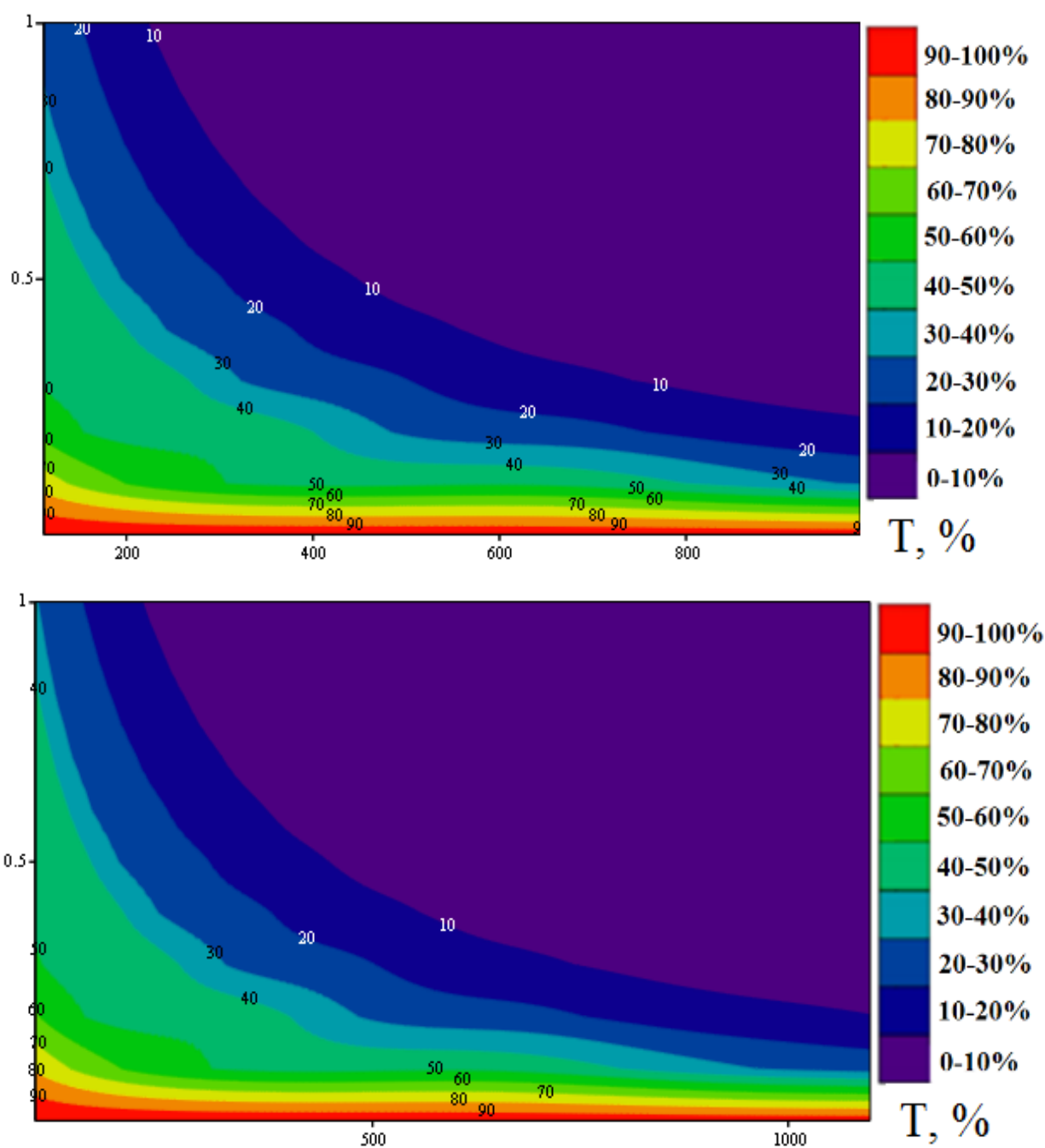


Рисунок 62 – Зависимость коэффициента прохождения от частоты и толщины образца в свободном пространстве для композита на основе феррита отечественного производства (сверху); сплошного феррита отечественного производства (снизу)

На рисунке 63 изображена зависимость коэффициента отражения от частоты и толщины измеряемых образцов.

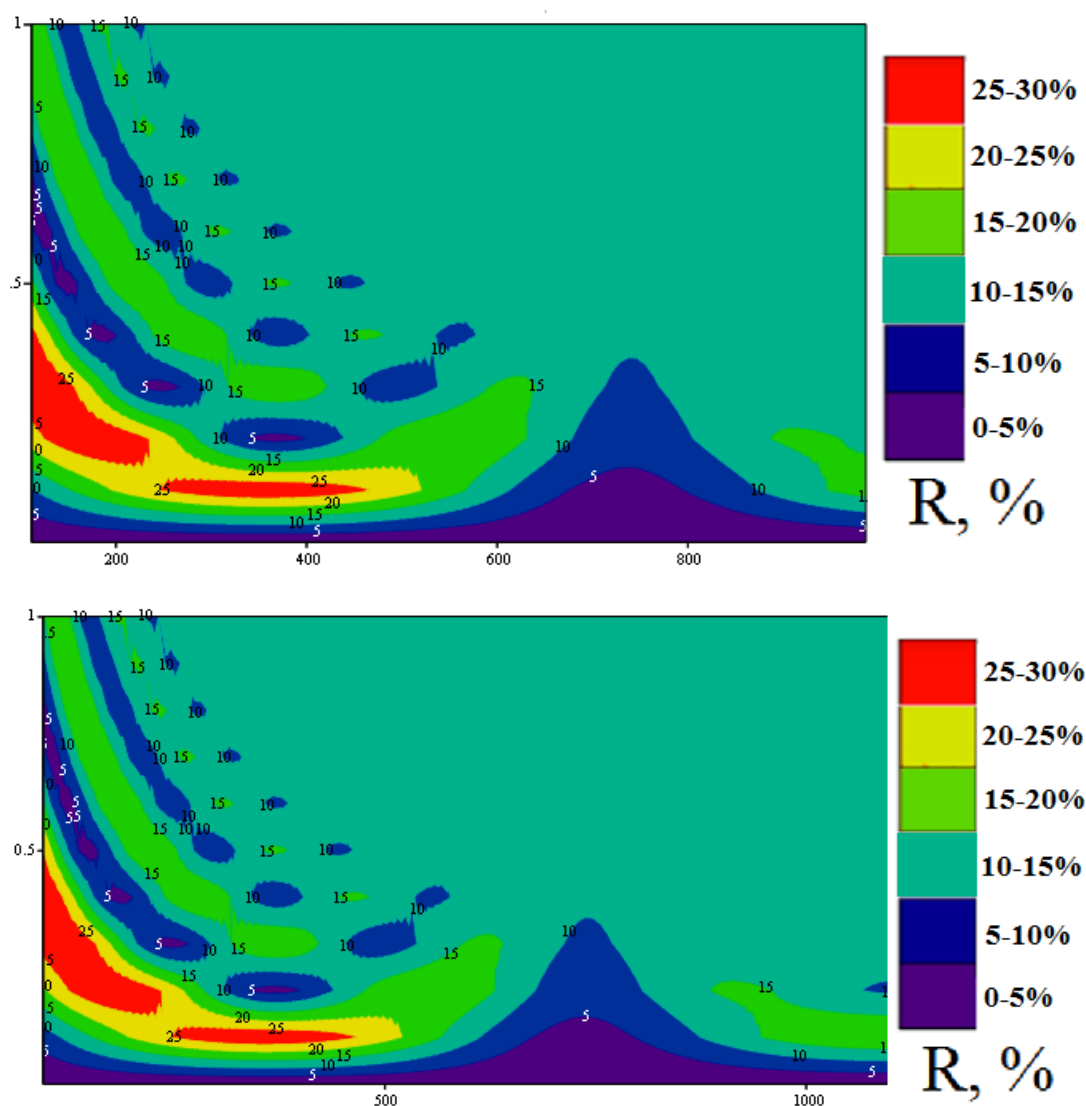


Рисунок 63 – Зависимость коэффициента отражения от частоты и толщины образца в свободном пространстве для композита на основе феррита отечественного производства (сверху); сплошного феррита отечественного производства (снизу)

Область максимального отражения мощности от образцов достигает 25%, но находится в диапазоне частот 0–500 ГГц при толщине образца 0,1–0,4 мм для композита, и в диапазоне 0–500 ГГц при толщине образца 0,1–0,5 мм для сплошного феррита. При различных толщинах в большей части диапазона отражение составляет от 10 до 15%.

Глядя на зависимость коэффициента поглощения от частоты и толщины измеряемых образцов, представленной на рисунке 64, можно заметить, что область оптимального поглощения находится в диапазоне частот 300–1000 ГГц при толщине образца свыше 0,3 мм.

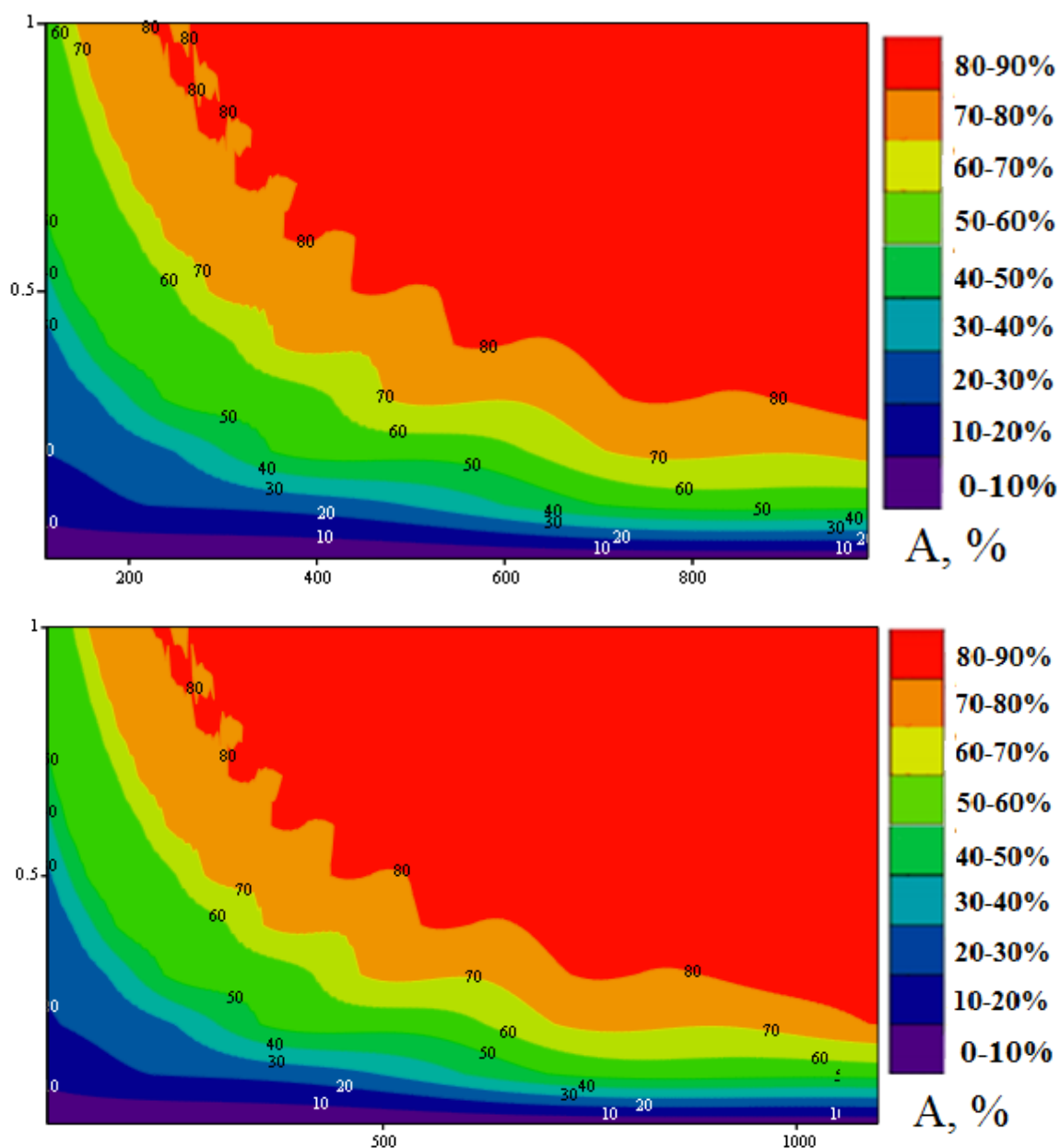


Рисунок 64 – Зависимость коэффициента поглощения от частоты и толщины образца в свободном пространстве для композита на основе феррита отечественного производства (сверху); сплошного феррита отечественного производства (снизу)

2.4 Выводы о проделанной работе

Сравнивая результаты измерений одних и тех же экспериментальных образцов на скалярном и векторном анализаторе цепей можно сделать вывод, что они в целом совпадают. Однако более корректные результаты дают измерения на Р4М-18.

В результате сравнения ЭМ характеристик феррита W-типа и композита на основе этого феррита было выявлено, что в связи с уменьшением плотности материала примерно в 5 раз, магнитная проницаемость уменьшилась примерно в 2 раза, и естественный ферромагнитный резонанс сдвигается в верх по частоте и становится более широким.

Аналогичная ситуация наблюдается и для ферритов кубической кристаллической структуры. При измельчении магнитного материала и уменьшении его плотности естественный ферромагнитный резонанс сдвигается в верх по частоте, а максимумы магнитной проницаемости становятся более широкими. Только при этом магнитная проницаемость уменьшается для композита на порядок по сравнению со сплошным образцом.

Однако, в обоих случаях диэлектрическая проницаемость при измельчении уменьшается лишь на 15–20 %.

В результате моделирования измерения коэффициентов R , T , A с помощью программы, написанной в среде Mathcad, было установлено, что российский и зарубежный ферриты в безэховой камере целесообразней использовать до 8 ГГц при толщине свыше 3,5 мм, так как именно в этом диапазоне находится область минимального отражения и максимального поглощения излучаемой мощности. Однако, у отечественного феррита эта область шире по частоте и ниже по толщине.

Было установлено, что феррит W-типа в качестве поглощающего материала целесообразно использовать в диапазоне 4–18 ГГц при толщине порядка 2,5 мм.

В результате эксперимента, заключавшемся в сравнении результатов измерения ЭМ характеристик образцов двух типов мы убедились, что со снижением плотности радиоматериала изменяются и его отдельные ЭМ параметры.

Таким образом, можно сделать вывод, что в сверхширокодиапазонных многофункциональных безэховых камерах зарубежный феррит можно заменить отечественным марки М400НН без ухудшения функциональных свойств.

3 Безопасность труда

Чтобы предприятие эффективно работало, немаловажно создать безопасные условия труда (БУТ). Безопасные условия – понятия субъективное, поэтому для его конкретизации на законодательном уровне введены различные нормы и правила, которые регулируют охрану труда рабочих. О том, что собой представляет данный термин и какие нормы были соблюдены при написании данной работы, далее в этой главе.

Безопасность труда (БТ) – это обобщенные требования, описанные в законодательных актах, которые обеспечивают БУТ и регулируют поведение работника в этих условиях. БУТ подразумевают исключение влияния опасных и вредных производственных факторов на здоровье сотрудников [20].

Охрана труда – это система сохранения жизни и здоровья работников в процессе трудовой деятельности, включающая в себя правовые, социально-экономические, организационно-технические, санитарно-гигиенические, лечебно-профилактические, реабилитационные и иные мероприятия.

Согласно статье 219 Трудового кодекса РФ каждый работник имеет право на рабочее место, соответствующее требованиям охраны труда [21]. Рабочее место влияет на эффективность деятельности работника, а также на производительность труда, поэтому оно должно соответствовать санитарно-эпидемиологическим правилам и нормам (СанПиН).

Написание дипломной работы осуществлялось в домашних условиях. Домашнее рабочее место располагается в комнате площадью 18 кв. м. В комнате одно окно, которое выходит на солнечную сторону, также имеется настольная лампа.

Рабочее место представляет собой стол, на котором располагаются ноутбук, беспроводная компьютерная мышь, а также стул.

СанПиН 2.2.4.3359-16 «Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах» является основным нормативно-правовым документом, который устанавливает санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам неионизирующей природы на рабочих местах, их источникам, а также требования к методам измерения физических факторов на рабочих местах и мерам профилактики вредного воздействия физических факторов на здоровье работающих.

Контроль за проведением лабораторных исследований и испытаний осуществляется индивидуальными предпринимателями и юридическими лицами в соответствии с законодательством Российской Федерации [22].

Опираясь на данный СанПиН, были проанализированы такие физические показатели как:

- микроклимат рабочего места;
- уровень шума на рабочем месте;
- количественные характеристики освещения;
- электробезопасность.

3.1 Микроклимат рабочего места

Климат внутренней среды различных помещений называется микроклиматом. Он определяется сочетанием нескольких параметров: тем, как влияет на организм человека температура воздуха и поверхностей, влажность воздуха и скорость его движения (подвижность).

В частности, высокие температуры приводят к тепловым ударам, повышению давления, низкие – к простудным заболеваниям, переохлаждению, низкая влажность провоцирует пересыхание слизистых оболочек дыхательных путей. Все это может привести и к профессиональным заболеваниям. В рамках принципов охраны труда первостепенной мерой считается обеспечение правильного микроклимата рабочего места [23].

Согласно СанПиН 2.2.4.3359-16, данная работа относится к категории Ia, потому что энергозатраты не превышают 139 Вт.

Для анализа микроклимата на рабочем месте необходимо знать оптимальные условия согласно СанПиН. В таблице 5 приведены оптимальные условия микроклимата и измеренные условия микроклимата рабочего места.

Таблица 5 – Оптимальные и измеренные условия микроклимата

Период года	Категория работ по уровням энергозатрат	Температура воздуха, °С	Температура поверхностей, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Оптимальные условия микроклимата					
Холодный	Ia	22-24	21-25	60-40	0,1
Измеренные условия микроклимата рабочего места					
Холодный	Ia	23	20-26	51	0

Температура воздуха была измерена при помощи комнатного термометра, а поверхности измерялись при помощи бесконтактного пирометра. Влажность воздуха была измерена при помощи часов, в которых есть встроенный гигрометр. В результате измерений было определено, что измеренные показатели соответствуют необходимым условиям, прописанным выше в таблице 5.

3.2 Уровень шума на рабочем месте

Затем были выполнены замеры уровня шума. Люди, подвергающиеся шумовому воздействию, жалуются на головные боли, которые могут иметь разную интенсивность и локализацию, головокружение при перемене положения тела, снижение памяти, повышенную утомляемость, сонливость, нарушения сна, эмоциональную неустойчивость, снижение аппетита, потливость, боли в области сердца [24]. Шумы уровня 80–100 дБ при длительном воздействии приводят к заболеванию нервной системы, а более 100 дБ – к снижению слуха, вплоть до глухоты [25].

Опираясь на требования СанПиН 2.2.2.542-96, уровень шума в помещении не должен превышать 65дБ [26].

Измерение шума проводилось при помощи мобильного приложения «Шумомер». Результат измерения представлен на рисунке 65.



Рисунок 65 – Измерение уровня шума на рабочем месте

Максимальное значение шума составило 41 дБ, что соответствует нормативному значению. Данное значение шума на рабочем месте не является вредным фактором, влияющим на состояние здоровья.

3.3 Количественные характеристики освещения

Также были выполнены замеры показателей освещенности на рабочем месте. Помещение, в котором работник проводит более 50% рабочего времени, должно иметь совместное освещение – присутствие как естественного освещения, так и искусственного. Плохое освещение способствует развитию близорукости. При недостатке освещения падает скорость различения предметов, также это ведёт к усталости центральной нервной системы, и в целом ухудшению эмоционального состояния человека. Чтобы избежать негативные последствия необходимо увеличить число ламп, увеличить качество освещения.

Согласно СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 значение освещенности рабочего места должно быть в интервале 300-500 лк [27]. Освещенность рабочего места была измерена при помощи мобильного приложения «Люксметр Про». Результат измерений представлен на рисунке 66.

- защита от напряжения: все токоведущие части должны быть изолированы;
- запрещается использовать поврежденные кабели и провода и другие электроприборы;
- для защиты от поражения электрическим током необходимо наличие защитного заземления;
- защита от токов короткого замыкания должна осуществляться быстродействующими устройствами защиты, автоматическими выключателями и предохранителями.

В случае поражения исследователя электрическим током, необходимо обесточить питающую сеть автоматическим выключателем, переместить пострадавшего в безопасное место, воспользоваться медицинской аптечкой для оказания первой медицинской помощи и вызвать скорую помощь.

В результате анализа и проведения измерения фактических показателей рабочего места можно сделать вывод, что рабочее место соответствует санитарно-гигиеническим правилам и нормам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проделанной работы были получены следующие результаты:

Проведен аналитический обзор литературных источников по тематике композиционных радиоматериалов на основе оксидных ферримagnetиков. Также был проведен анализ публикационной активности по данной тематике.

Изготовлены измерительные образцы из сплошных ферритов различного производства и для измерения на различных измерительных установках.

Проведено измерение электромагнитных характеристик (R , T , A) и рассчитаны их магнитные и диэлектрические проницаемости.

Также было проведено моделирование измерения коэффициентов отражения, прохождения и поглощения отечественного и зарубежного ферритов, на основе посчитанных ранее данных диэлектрической и магнитной проницаемостей с помощью программы, написанной в среде Mathcad.

Проведен анализ полученных данных, в результате которого было выявлено, что уменьшение плотности радиоматериалов действительно влияет на их электромагнитные свойства. А также было установлено, что в сверхширокодиапазонных безэховых камерах зарубежный феррит можно заменить отечественным марки М400НН без ухудшения функциональных свойств.

Часть результатов, полученных в ходе выполнения данной работы, была представлена на Всероссийской конференции студенческих научно-исследовательских инкубаторов 2019 и 2020 годов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ И ЛИТЕРАТУРЫ

1. Научная электронная библиотека – [Б. м.], – URL: <https://elibrary.ru> (Дата обращения 5.05.2019).
2. Доценко О.А. Радиоматериалы и радиокомпоненты: [учеб.-метод. пособие] / О.А. Доценко. Томск: Изд-во Том. ун-та. 2011. 96 с.
3. Студопедия. Ферритмагнетики – [Б. м.], – URL: <https://studopedia.su> (Дата обращения: 15.12.18).
4. Pullar R.C. Hexagonal ferrites: A review of the synthesis, properties and applications of hexaferrite ceramics / R.C. Pullar // Progress in Materials Science. 2012. V. 57. P. 1191–1334.
5. Scopus – международная реферативная база данных – [Б. м.], – URL: <http://www.scopus.com> (Дата обращения 12.05.2019).
6. Физический энциклопедический словарь – [Б. м.], – URL: <https://gufo.me/dict/physics>. (Дата обращения: 16.12.18).
7. Студенческая библиотека Studbooks – [Б. м.], – URL: <https://studbooks.net> (Дата обращения: 15.12.18).
8. Файловый архив студентов StudFiles – [Б. м.], – URL: <https://studfiles.net> (Дата обращения: 16.12.18).
9. Костишин В.Г. О механизме формирования гексагонального феррита / В.Г. Костишин, В.В. Коровушкин, Д.Н. Читанов, А.Г. Налогин, Н.Д. Урсуляк // Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона». 2015. №3. 11 с. URL: <http://www.ivdon.ru> (Дата обращения: 20.12.18).
10. Файловый архив студентов StudFiles – [Б. м.], – URL: <https://studfiles.net> (Дата обращения: 1.02.18).
11. Землянухин Ю.П. Электромагнитные характеристики композиционных радиоматериалов, активно взаимодействующих с электромагнитным излучением миллиметрового диапазона: Дис. на соискание уч. степ. канд. техн. наук / Ю.П. Землянухин. Томск. – 2014. – 118 с.
12. Wu Y. P. Size effect on the static and dynamic magnetic properties of W-type barium ferrite composites: From microparticles to nanoparticles / Y.P. Wu, C.K. Ong // Journal of applied physics. – 2005. – V. 98. – P. 1–8.

13. Narang S. Broad-band microwave absorption and magnetic properties of M-type $\text{Ba}_{(1-2x)}\text{La}_x\text{Na}_x\text{Fe}_{10}\text{Co}_{0.5}\text{TiMn}_{0.5}\text{O}_{19}$ hexagonal ferrite in 18.0–26.5 GHz frequency range / S. Narang // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2019. – V. 473. – P. 272–277.
14. Qian K. The influence of Nd substitution in Ni–Zn ferrites for the improved microwave absorption properties / K. Qian, Z. Yao, H. Lin, J. Zhou, A. A. Haidry, T. Qi, W. Chen, X. Guo // *Ceramics International*. – 2020. – P. 227–235.
15. Salem M.M. Dielectric and magnetic properties of two-phase composite system: Mn-Zn or Ni-Zn ferrites in dielectric matrices / M.M. Salem, A.T. Morchenko, L.V. Panina, V.G. Kostishyn, V.G. Andreev, S.B. Bibikov, A.N. Nikolaev // *Physics Procedia*. – 2015. – P. 1360–1369.
16. Wilke I. Optical and Dielectric Properties of Manganese Cobalt Ferrite at Terahertz Frequencies / A.N. Fernando, I. Wilke, A.M. Carlos // *Latin America Optics and Photonics Conference*. – 2016. – P. 1–3.
17. Chaudhuri A. Electromagnetic Response of $\text{SiO}_2@\text{Fe}_3\text{O}_4$ Core–Shell Nanostructures in the THz Regime / R. Rakshit, S. Kazunori, M. Tonouchi, K. Mandal // *IEEE transactions on magnetics*. – 2021. – P. 1–6.
18. Вебион – [Б. м.], – URL: <http://vebion.ru> (Дата обращения 6.05.2019)
19. Микран – [Б. м.], – URL: <https://www.micran.ru> (Дата обращения 6.05.2019).
20. Онлайн-журнал про охрану труда – [Б. м.], – URL: <https://ohranatryda.ru> (Дата обращения 14.01.2022).
21. Консультант Плюс – [Б. м.], – URL: <http://www.consultant.ru> (Дата обращения 14.01.2022).
22. Электронный фонд технических документов – [Б. м.], – URL: <https://docs.cntd.ru> (Дата обращения 15.01.2022).
23. Мир климата – [Б. м.], – URL: <https://mir-klimata.info> (Дата обращения 15.01.2022).
24. Влияние шума на организм человека – [Б. м.], – URL: <https://zazdorovye.ru> (Дата обращения 15.01.2022).
25. Научный журнал. Успехи современного естествознания – [Б. м.], – URL: <https://www.natural-sciences.ru> (Дата обращения 16.01.2022).

26. СанПиН 2.2.2.542-96 Гигиенические требования к видеодисплейным терминалам, персональным ЭВМ и организации работы – [Б. м.], – URL: <https://docs.cntd.ru> (Дата обращения 16.01.2022).

27. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 О введении в действие санитарно-эпидемиологических правил и нормативов – [Б. м.], – URL: <https://docs.cntd.ru> (Дата обращения 16.01.2022).

28. Измеритель комплексных коэффициентов передачи и отражения Р4М-18 – [Б. м.], – URL: <https://elaso.com.ua> (Дата обращения 16.01.2022).

Отчет о проверке на заимствования №1



Автор: Беломытцев Игорь
Проверяющий: Беломытцев Игорь (ga200g221122@gmail.com / ID: 9340877)
Отчет предоставлен сервисом «Антиплагиат» - users.antiplagiat.ru

Руководитель ВКР
канд. физ.-мат. наук, доцент
Кулешов Г.Е. Кулешов

ИНФОРМАЦИЯ О ДОКУМЕНТЕ

№ документа: 2
Начало загрузки: 17.01.2022 22:27:55
Длительность загрузки: 00:00:03
Имя исходного файла: ВКР Итог.pdf
Название документа: ВКР Итог
Размер текста: 98 кБ
Символов в тексте: 104110
Слов в тексте: 12495
Число предложений: 725

ИНФОРМАЦИЯ ОБ ОТЧЕТЕ

Начало проверки: 17.01.2022 22:28:00
Длительность проверки: 00:00:02
Комментарии: не указано
Модули поиска: Интернет Free



ЗАИМСТВОВАНИЯ
4,55%

САМОЦИТИРОВАНИЯ
0%

ЦИТИРОВАНИЯ
0%

ОРИГИНАЛЬНОСТЬ
95,45%