

На правах рукописи

Иванов Павел Алексеевич

**МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ЭФФЕКТИВНЫХ СВЧ ПАРАМЕТРОВ
МАТЕРИАЛОВ В ДВУХСВЯЗНЫХ ПОЛОСКОВЫХ ЛИНИЯХ ПЕРЕДАЧИ**

1.3.13 — Электрофизика, электрофизические установки

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва, 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теоретической и прикладной электродинамики Российской академии наук (ИТПЭ РАН)

Научный руководитель:

Розанов Константин Николаевич

д.ф.-м.н., директор ИТПЭ РАН, г. Москва

Официальные оппоненты:

Костишин Владимир Григорьевич

д.ф.-м.н., заведующий кафедрой технологии материалов электроники Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет „МИСИС“», г. Москва

Шапаева Татьяна Борисовна

д.ф.-м.н., доцент кафедры магнетизма физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», г. Москва

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского», г. Саратов

Защита состоится 17.12.2025 на заседании Диссертационного совета 99.1.044.02 на базе ИТПЭ РАН при участии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук по адресу: 125412, Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 6, конференц-зал (комната 306)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИВТ РАН.

Автореферат разослан _____ 2026 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета 99.1.044.02

доктор физико-математических наук

Пухов А.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Материалы со специальными электрофизическими свойствами в СВЧ диапазоне, включая магнитные пленки, магнитодиэлектрические композиты и метаматериалы, применяются в радиопоглощающих покрытиях, электромагнитных экранах, средствах обеспечения электромагнитной совместимости и других функциональных элементах радиоэлектронной аппаратуры. Взаимодействие таких материалов с электромагнитным полем определяется комплексными частотно-зависимыми диэлектрической и магнитной проницаемостями, а для ряда структур — также комплексным коэффициентом отражения. Экспериментальное определение этих характеристик в широком диапазоне частот является необходимым условием исследования и практического применения таких материалов. Особое значение имеет определение магнитной проницаемости, частотная зависимость которой определяется магнитной анизотропией, размагничивающими полями, электропроводностью, структурой, геометрией и технологией изготовления образца.

Для определения материальных параметров в СВЧ диапазоне применяются коаксиальные, волноводные, резонансные методы и методы измерения в свободном пространстве. Эти подходы хорошо разработаны, однако каждый из них имеет ограничения. Коаксиальные методы требуют образцов специальной формы и чувствительны к воздушным зазорам. Волноводные методы позволяют проводить измерения с высокой точностью в рабочем диапазоне основной моды, однако их частотный диапазон ограничен снизу частотой отсечки, а сверху — возбуждением высших мод. Квазиоптические методы удобны для исследования листовых материалов, но в низкочастотной области требуют образцов большого размера. Резонансные методы обладают высокой чувствительностью, однако не позволяют получать непрерывные широкополосные частотные зависимости материальных параметров.

В связи с этим представляет интерес развитие методов измерения в двухсвязных линиях передачи, прежде всего в полосковых и микрополосковых измерительных ячейках. Такие линии позволяют проводить широкополосные измерения и исследовать листовые образцы, поперечные размеры которых в низкочастотной области могут быть существенно меньше длины волны в свободном пространстве. Важным преимуществом полосковых ячеек при исследовании пленочных материалов является возможность размещения пленки непосредственно на исходной подложке без сворачивания или иной механической формовки образца под геометрию измерительного тракта. Это уменьшает влияние механической деформации на свойства пленки и особенно существенно для материалов с выраженной магнитострикцией. Кроме того, полосковые ячейки

допускают измерения при частичном заполнении поперечного сечения линии, что снижает требования к форме и количеству исследуемого материала.

Вместе с тем, использование частичного заполнения поперечного сечения линии связано с определенными трудностями. Измерения в полосковых линиях обычно основаны на квази-ТЕМ приближении, предполагающем, что распространяющаяся волна близка к поперечной электромагнитной волне. Точность квази-ТЕМ приближения может снижаться при увеличении толщины образца относительно зазора линии, высоких значениях диэлектрической или магнитной проницаемости материала и несимметричном расположении образца. Дополнительное ограничение связано с возбуждением высших мод.

Определение материальных параметров по измеренным S -параметрам требует предварительной калибровки измерительного тракта для учета систематических погрешностей. Для стандартных коаксиальных и волноводных трактов разработаны типовые калибровочные процедуры и наборы эталонов, тогда как для нестандартных полосковых измерительных ячеек такие наборы, как правило, отсутствуют. При этом особенности конструкции полосковых ячеек создают дополнительные источники погрешности, связанные с отражениями от коаксиально-полосковых переходов, неоднородностями измерительного тракта, паразитными резонансами и неопределенностью положения опорной плоскости относительно образца. Это обуславливает необходимость разработки специальных калибровочных процедур, адаптированных к конкретной измерительной ячейке и, по возможности, реализуемых непосредственно в рабочем измерительном тракте.

Таким образом, дальнейшее развитие полосковых методов измерения может расширить возможности широкополосного исследования листовых, тонкопленочных и периодических структур, особенно в случаях, когда применение традиционных методов затруднено требованиями к форме, размерам или количеству образца.

Цель работы — разработка и обоснование методов определения СВЧ параметров материалов в двухсвязных полосковых линиях передачи с учетом систематических погрешностей измерительного тракта, частичного заполнения поперечного сечения линии и границ применимости квази-ТЕМ приближения, а также применение разработанных методов для экспериментального исследования СВЧ параметров материалов.

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

1. Исследование границ применимости квази-ТЕМ приближения при определении комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей в полосковых линиях с частичным заполнением поперечного сечения образцом.

2. Разработка методики измерения комплексной магнитной проницаемости тонких магнитных пленок в короткозамкнутой полосковой измерительной ячейке на основе измерения коэффициента отражения (однопортовая методика).

3. Разработка калибровочных процедур, позволяющих уменьшить влияние неоднородностей измерительного тракта и коаксиально-полосковых переходов на результат измерения материальных параметров.

4. Разработка методики измерения комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей композитных образцов в экранированной полосковой линии передачи при частичном заполнении ее поперечного сечения на основе измерения коэффициентов отражения и прохождения (двухпортовая методика).

5. Разработка однопортовой методики определения коэффициента отражения, а также диэлектрической и магнитной проницаемостей листовых материалов и двумерных периодических структур в открытой симметричной полосковой ячейке с использованием образцов существенно меньшего поперечного размера, чем при измерениях в свободном пространстве.

6. Разработка методики определения комплексного импеданса сосредоточенной нагрузки и восстановления коэффициента отражения поляризационно-чувствительной нагруженной периодической структуры по результатам измерений отдельных элементов в открытой симметричной полосковой ячейке.

7. Применение разработанных полосковых методик для экспериментального исследования СВЧ свойств тонких магнитных пленок, многослойных пленочных материалов, магнитодиэлектрических композитов и метаматериалов.

Научная новизна работы заключается в разработке и экспериментальном обосновании группы методов определения СВЧ характеристик материалов в полосковых линиях передачи, расширяющих возможности исследования образцов при частичном заполнении поперечного сечения линии. Предложены интегральные параметры, позволяющие количественно оценивать применимость квази-ТЕМ приближения с учетом геометрии, положения и электромагнитных свойств исследуемого образца. Получены зависимости предельной частоты применимости квази-ТЕМ приближения от толщины и электромагнитных параметров образца.

Разработаны однопортовая методика определения комплексной магнитной проницаемости тонких пленок с калибровкой непосредственно в измерительной ячейке и учетом возможного отличия магнитной проницаемости от единицы при максимальном внешнем магнитном поле, а также двухпортовая методика определения комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей композитных материалов с калибровкой по трем эталонным измерениям.

Разработаны две методики на основе открытой симметричной полосковой ячейки: однопортовая двухпозиционная методика определения коэффициента

отражения и диэлектрической и магнитной проницаемостей листовых материалов и двумерных периодических структур и методика определения импеданса сосредоточенной нагрузки и восстановления коэффициента отражения нагруженных периодических структур.

С использованием разработанных методов получены новые экспериментальные результаты: измерен спектр магнитной проницаемости пленки Co толщиной 17 нм, установлена размерная зависимость СВЧ магнитного отклика периодических структур из квадратных элементов ламинированного материала на основе пленок железа, определены эффективные параметры двумерного композита в низкочастотной области СВЧ диапазона.

Достоверность результатов диссертационной работы обеспечивается использованием современных методов СВЧ измерений, электродинамического моделирования и общепринятых способов обработки экспериментальных данных. Обоснованность предложенных методик подтверждается сопоставлением результатов, полученных независимыми способами. Спектры магнитной проницаемости пленок сопоставлены с результатами коаксиальных измерений и расчетами по магнитостатическим параметрам. Для двумерных периодических структур получено согласие комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей с результатами квазиоптических измерений. Для композита выполнено сопоставление результатов полоскового, коаксиального и квазиоптического методов. Для нагруженной периодической структуры восстановленный коэффициент отражения согласуется с непосредственным полноволновым расчетом и квазиоптическим измерением.

Практическая значимость результатов работы состоит в расширении экспериментальных возможностей исследования новых функциональных материалов и периодических структур, для которых применение существующих методов затруднено требованиями к форме, размерам или количеству образца. Разработанная однопортовая методика позволяет определять комплексную магнитную проницаемость тонких магнитных пленок на жестких и гибких подложках в диапазоне частот до 20 ГГц. Методики на основе открытой симметричной полосковой ячейки позволяют исследовать листовые материалы и двумерные периодические структуры с использованием образцов существенно меньшего поперечного размера, чем при измерениях в свободном пространстве. Для периодических структур с сосредоточенными нагрузками разработанная методика позволяет определять комплексный импеданс нагрузки по результатам полосковых измерений отдельных элементов. На основе полученных данных восстанавливается коэффициент отражения периодической структуры.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Предложенные интегральные параметры A_E и A_H , характеризующие относительный вклад продольных компонент электрического и магнитного полей в объеме образца, позволяют количественно оценивать отклонение структуры поля от квази-ТЕМ волны. Предельная частота применимости квази-ТЕМ приближения, определяемая по допустимому расхождению показателей преломления фундаментальной моды при полноволновом и квази-ТЕМ расчетах, зависит от толщины и электромагнитных параметров образца при заданной геометрии измерительной линии. Полученные зависимости позволяют оценивать верхнюю рабочую частоту для заданных параметров образца.

2. Разработанная однопортовая методика измерения комплексной магнитной проницаемости тонких магнитных пленок и листовых образцов в короткозамкнутой полосковой ячейке с калибровкой по трем положениям подвижного короткозамыкателя позволяет снизить влияние систематических погрешностей измерительного тракта, повысить чувствительность к слабому магнитному отклику и расширить рабочий частотный диапазон, верхняя граница которого в реализованной установке составляет 20 ГГц.

3. Разработанная двухпортовая методика позволяет определять комплексные диэлектрическую и магнитную проницаемости листовых композитных образцов малого размера при частичном заполнении экранированной полосковой линии без придания образцу специальной формы. Калибровка с использованием эталонных образцов, выполняемая непосредственно в рабочей полосковой линии, позволяет учитывать систематические погрешности измерительного тракта.

4. Разработанная однопортовая двухпозиционная методика позволяет определять комплексный коэффициент отражения, комплексные диэлектрическую и магнитную проницаемости листовых материалов, включая двумерные периодические структуры, по двум измерениям, выполненным при различных положениях образца в открытой симметричной полосковой ячейке. Методика позволяет использовать образцы существенно меньшего поперечного размера, чем при измерениях в свободном пространстве.

5. Разработанная методика, основанная на измерениях отдельных элементов нагруженной периодической структуры в открытой симметричной полосковой ячейке, позволяет определять комплексный импеданс сосредоточенной нагрузки и восстанавливать коэффициент отражения периодической структуры.

6. Размер квадратных элементов периодической структуры из ламинированного материала на основе пленок железа определяет положение области магнитных потерь: при уменьшении размера элементов максимум

магнитных потерь смещается в область более высоких частот, а в исследованном диапазоне резонансная частота линейно зависит от обратного размера элемента. Наблюдаемая зависимость согласуется с представлением об электродинамическом размерном резонансе, характерная частота которого обратно пропорциональна размеру элемента.

Апробация результатов работы. Основные результаты работы были представлены на 12 российских и международных конференциях и школах в виде стендовых и устных докладов: международный молодежный научный форум «Ломоносов» (Москва, 2019, 2020); международный научный форум «Новые материалы и перспективные технологии» (Москва, 2021); Samarkand International Symposium on Magnetism «SISM-2023», «SISM-2026» (Uzbekistan, Samarkand, 2023, 2026); Всероссийская научная школа-семинар «Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами» (Саратов, 2024), Ежегодная научная конференция ИТПЭ РАН (Москва, 2021 – 2026).

Результаты диссертационной работы использованы при выполнении гранта Российского научного фонда №25-19-00393 и при проведении научных исследований в рамках подпрограммы 6 Программы фундаментальных научных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период (2021–2030 годы) по теме 12.1.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 6 статьях, из которых 4 статьи индексируются базами данных Web of Science и Scopus, а также в 17 тезисах докладов на научных конференциях. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2025689837. Программа предназначена для автоматизированного проведения измерений S -параметров, обработки полученных данных и определения электрофизических параметров исследуемых материалов.

Личный вклад автора. Основные результаты диссертационной работы получены при определяющем личном вкладе автора. Формулировка цели и постановка задач проведены диссертантом совместно с научным руководителем. Автором выполнены разработка измерительных методик, вывод расчетных соотношений, численное электродинамическое моделирование, анализ источников погрешности измерений, проведение СВЧ измерений, обработка экспериментальных данных и обобщение полученных результатов. Автору принадлежит ведущая роль в формулировке положений и основных выводов работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность разработки методов измерения СВЧ параметров материалов в полосковых линиях передачи, сформулированы цель и задачи исследования, приведены научная новизна, практическая значимость и основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** рассмотрены известные методы определения комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей материалов в СВЧ диапазоне. Проведено сравнение резонансных и нерезонансных методов определения электромагнитных параметров материалов, реализуемых с использованием коаксиальных линий, прямоугольных волноводов, установок для измерений в свободном пространстве и планарных линий передачи [1–5].

Коаксиальные и волноводные методы требуют образцов специальной формы и полного заполнения поперечного сечения измерительной линии. При исследовании тонких пленок дополнительным ограничением может стать необходимость изгиба или сворачивания образца для его размещения в измерительном тракте. Методы измерения в свободном пространстве позволяют исследовать листовые материалы, однако в низкочастотной области требуют образцов большого поперечного размера [2, 6].

Полосковые линии позволяют исследовать листовые образцы малого размера, тонкие пленки и материалы, частично заполняющие поперечное сечение линии, без сложной механической подготовки. Вместе с тем использование полосковых измерительных ячеек связано с рядом методических ограничений. При частичном заполнении поперечного сечения образцом структура поля отклоняется от ТЕМ-волны и становится чувствительной к геометрии и положению образца.

Одним из существенных источников погрешности являются неоднородности измерительного тракта, в том числе коаксиально-полосковые переходы. Для стандартных коаксиальных и волноводных трактов разработаны типовые калибровочные процедуры и наборы эталонов, однако их непосредственное применение в нестандартных полосковых ячейках затруднено конструктивными особенностями последних. Калибровка, выполненная на коаксиальном входе, не позволяет полностью исключить влияние последующего коаксиально-полоскового перехода и неоднородностей измерительной ячейки. Поэтому возникает необходимость разработки специальных калибровочных процедур, реализуемых непосредственно в рабочем измерительном тракте и позволяющих учитывать его систематические погрешности. На более высоких частотах дополнительными ограничениями становятся возбуждение высших мод и возникновение паразитных резонансов в измерительной ячейке.

При обработке результатов измерений в полосковых и микрополосковых линиях обычно используется квази-ТЕМ приближение. Проведенный анализ показывает, что при частичном заполнении поперечного сечения линии точность этого приближения зависит не только от частоты, но и от толщины образца, его положения относительно проводников линии и электромагнитных параметров материала.

Рассмотрены известные подходы к учету неполного заполнения поперечного сечения полосковой линии образцом. При частичном заполнении поперечного сечения полосковой линии непосредственно из измерений определяются эффективные параметры участка линии $\varepsilon_{\text{эфф}}$ и $\mu_{\text{эфф}}$, характеризующие совместный отклик образца и незаполненной части поперечного сечения. Для перехода от эффективных параметров к собственным параметрам материала используются различные приближения, отличающиеся способом учета распределения электромагнитного поля. Наиболее простым подходом является использование эмпирического коэффициента заполнения K , связывающего эффективную $\chi_{\text{эфф}}$ и собственную χ_{int} магнитные восприимчивости соотношением:

$$\chi_{\text{int}} = \frac{K}{t} \chi_{\text{эфф}} \quad (1)$$

где t — толщина магнитного слоя. Эмпирический коэффициент K определяется геометрией измерительной ячейки и распределением поля и в общем случае зависит от параметров образца.

В качестве предельного случая рассмотрено плоскостойкое приближение, соответствующее последовательному соединению слоев по магнитной индуктивности. В этом случае связь между эффективной и собственной магнитной восприимчивостями записывается в виде:

$$\chi_{\text{int}} = \frac{h}{t} \chi_{\text{эфф}} \quad (2)$$

где h — расстояние между проводниками линии. Это выражение эквивалентно использованию коэффициента $K = h$.

В качестве более строгого квазистатического подхода рассмотрен вариационный метод [7, 8], позволяющий учитывать реальное распределение электромагнитного поля в неоднородно заполненном поперечном сечении линии. В рамках этого метода эффективные параметры участка линии определяются через отношения погонных емкости и индуктивности линии с образцом к соответствующим величинам для пустой линии:

$$\varepsilon_{\text{эфф}} = \frac{C}{C_0}, \quad \mu_{\text{эфф}} = \frac{L}{L_0} \quad (3)$$

где C и L — погонные емкость и индуктивность линии с образцом, C_0 и L_0 — соответствующие величины для пустой линии. Погонные емкость и индуктивность рассчитываются с учетом распределения поля в неоднородном поперечном сечении из выражений:

$$L = \frac{\iint_S G_m(x, y_0; x_0, y_0) j(x) j(x_0) dx dx_0}{\left(\int_S j(x) dx\right)^2}, \quad C = \frac{\left(\int_S \rho(x) dx\right)^2}{\iint_S G_e(x, y_0; x_0, y_0) \rho(x) \rho(x_0) dx dx_0} \quad (4)$$

где S — область, занимаемая центральным полосковым проводником в плоскости поперечного сечения, $j(x)$ — распределение поверхностной плотности тока, $\rho(x)$ — поверхностной плотности заряда, G_m и G_e — функции Грина соответствующих магнитостатической и электростатической задач. Собственные ε и μ исследуемого материала определяются путем подбора их значений до совпадения рассчитанных и экспериментально определенных эффективных параметров.

Связь измеренного коэффициента отражения с эффективными параметрами участка полосковой линии описывается через его нормированный входной импеданс:

$$Z_{\text{вх}} = \sqrt{\frac{\mu_{\text{эфф}}}{\varepsilon_{\text{эфф}}}} \operatorname{th} \left(i \frac{2\pi l_s}{\lambda} \sqrt{\varepsilon_{\text{эфф}} \mu_{\text{эфф}}} \right), \quad \Gamma = \frac{Z_{\text{вх}} - 1}{Z_{\text{вх}} + 1} \quad (5)$$

где $Z_{\text{вх}}$ — нормированный входной импеданс исследуемого участка полосковой линии, $\varepsilon_{\text{эфф}} = \varepsilon'_{\text{эфф}} - i\varepsilon''_{\text{эфф}}$ и $\mu_{\text{эфф}} = \mu'_{\text{эфф}} - i\mu''_{\text{эфф}}$ — его эффективные комплексные диэлектрическая и магнитная проницаемости, l_s — длина исследуемого образца, λ — длина волны в свободном пространстве, Γ — комплексный коэффициент отражения.

Проведено сравнительное рассмотрение указанных способов учета неполного заполнения. Показано, что для полосковой ячейки с шириной центрального проводника $W_{\text{strip}} = 5$ мм и расстоянием между проводниками $h = 1$ мм эффективный коэффициент K , определяемый вариационным методом, зависит от свойств образца, характеризуемых параметром $\chi't$. На рисунке 1 приведены зависимости действительной и мнимой частей коэффициента K , а также соответствующей погрешности определения магнитной проницаемости при использовании упрощенных приближений. Показано, что использование постоянного коэффициента K , соответствующего пределу малой магнитной нагрузки, обеспечивает приемлемую точность лишь в ограниченной области параметров. Плоскостное приближение $K = h$ для рассматриваемой геометрии приводит к существенно большей погрешности. На основании этого для последующего определения собственных параметров материала в работе выбран вариационный метод как наиболее точный из рассмотренных квазистатических подходов.

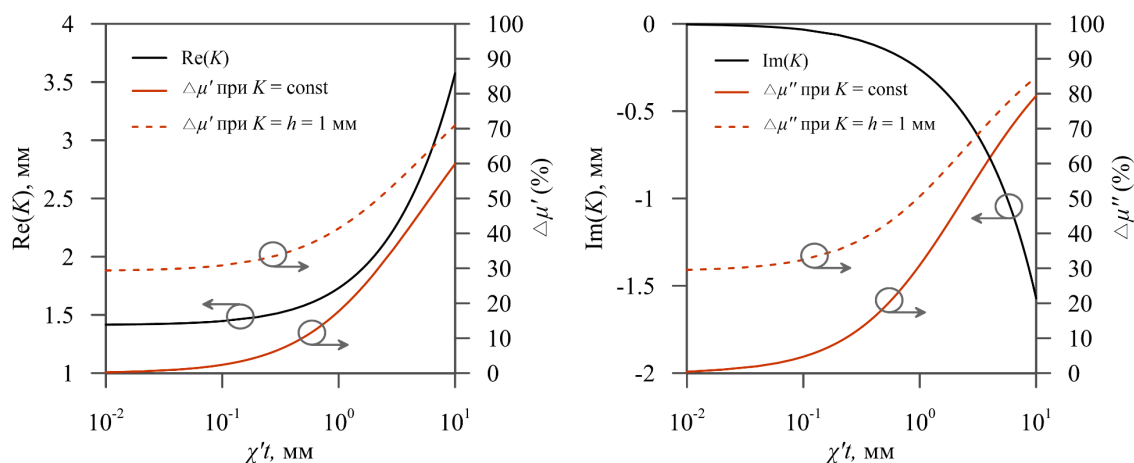


Рисунок 1 — Зависимости действительной и мнимой частей коэффициента K , определенного вариационным методом, и относительной погрешности определения магнитной проницаемости при использовании упрощенных моделей учета неполного заполнения. Расчет выполнен для $W_{\text{strip}} = 5$ мм, $h = 1$ мм и $\tan \delta_\mu = 0,1$

Таким образом, в первой главе обоснована необходимость учета неполного заполнения полосковой линии, оценки границ применимости квази-ТЕМ приближения и разработки калибровочных процедур для конкретных измерительных ячеек. На основании проведенного анализа сформулированы задачи дальнейшего исследования.

Во **второй главе** представлены результаты исследования границ применимости квази-ТЕМ приближения при определении диэлектрической и магнитной проницаемостей материалов в полосковых линиях передачи. Рассмотрены однопортовые и двухпортовые измерительные конфигурации с различным расположением образца относительно центрального проводника линии.

Для исследования влияния геометрии измерительной линии и расположения образца на структуру поля выполнено полноволновое электродинамическое моделирование с использованием программного комплекса FEKO.

Установлено, что относительный вклад продольной компоненты магнитного поля существенно зависит от симметрии измерительной линии и способа размещения образца. Наибольшее отклонение структуры поля от ТЕМ-волны наблюдается при несимметричном заполнении линии, тогда как симметричное размещение одинаковых образцов по обе стороны центрального проводника уменьшает долю продольной компоненты. Однако локальная оценка отношения продольной и поперечной компонент поля не позволяет непосредственно связать наблюдаемое отклонение с погрешностью определения материальных параметров. Поэтому для дальнейшего количественного анализа были введены интегральные параметры, рассчитываемые по объему образца:

$$A_E = \frac{\int_{V_s} |E_l| dV}{\int_{V_s} \sqrt{|E_t|^2 + |E_l|^2} dV}, \quad A_H = \frac{\int_{V_s} |H_l| dV}{\int_{V_s} \sqrt{|H_t|^2 + |H_l|^2} dV}, \quad (6)$$

где E_l и H_l — продольные, а E_t и H_t — поперечные компоненты электрического и магнитного полей, V_s — объем исследуемого образца. Далее значения A_E и A_H приводятся в процентах.

Установлена связь параметров A_H и A_E с погрешностью определения материальных параметров. Для рассмотренного набора конфигураций погрешность определения магнитной проницаемости не превышала 10 % при значениях A_H , не превышающих приблизительно 5 %. Для диэлектрической проницаемости аналогичной области соответствовали значения A_E порядка 20 %. Установлено, что при увеличении толщины образца доля продольных компонент поля возрастает. Наименьшие значения A_H получены при симметричном размещении двух одинаковых образцов по обе стороны центрального проводника. Одностороннее и несимметричное размещение приводят к более сильному отклонению поля от ТЕМ-волны и к увеличению погрешности определения магнитной проницаемости.

Для получения количественных практических оценок границ применимости квази-ТЕМ приближения проведено сопоставление эффективного показателя преломления основной моды n_{FW} , рассчитанного полноволновым методом, с его значением в квази-ТЕМ приближении n_{QT} . В качестве меры расхождения использовалась величина $\delta_n = |n_{FW} - n_{QT}|/|n_{FW}|$, а предельная частота f_{QT} определялась из условия $\delta_n = 10$ %. Полученные зависимости f_{QT} от толщины образца представлены на рисунке 2. Видно, что увеличение как толщины образца, так и его диэлектрической и магнитной проницаемостей приводит к существенному снижению верхней частотной границы применимости квази-ТЕМ приближения. Полученные зависимости позволяют для заданной толщины образца оценивать верхнюю рабочую частоту измерения.

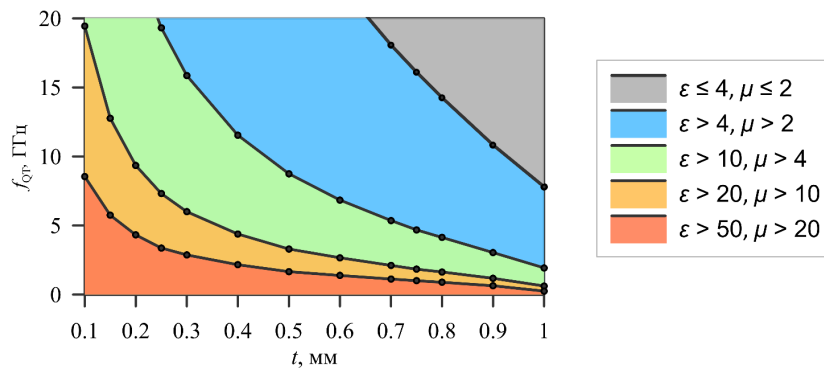


Рисунок 2 — Предельная частота применимости квази-ТЕМ приближения f_{QT} в зависимости от толщины образца t для различных диапазонов диэлектрической и магнитной проницаемостей в несимметричной полосковой линии с односторонним размещением образца при $\tan \delta_\mu = \tan \delta_\epsilon = 0,025$ и допустимом расхождении $\delta_n = 10\%$

В третьей главе рассмотрена однопортовая методика определения комплексной магнитной проницаемости тонких магнитных пленок в короткозамкнутой полосковой измерительной ячейке и представлены результаты ее экспериментальной проверки.

Внешний вид и продольная схема ячейки показаны на рисунке 3. В процессе измерений ячейка располагалась в рабочем зазоре электромагнита, создававшего постоянное магнитное поле напряженностью до 5000 Э. Исследуемый образец размещался вблизи короткозамыкающей стенки. Ячейка снабжена подвижной короткозамыкающей стенкой, выполненной из двух плотно соединяющихся частей, охватывающих центральный полосковый проводник. В одной из частей был выполнен фрезерованный паз под поперечное сечение центрального проводника, а после установки стенки в заданное положение ее части прижимались немагнитной струбциной, обеспечивающей плотное прилегание и воспроизводимый электрический контакт. Последовательное перемещение стенки позволяет формировать несколько эталонных состояний с известными фазовыми сдвигами и выполнять полную однопортовую калибровку непосредственно в рабочей измерительной ячейке.

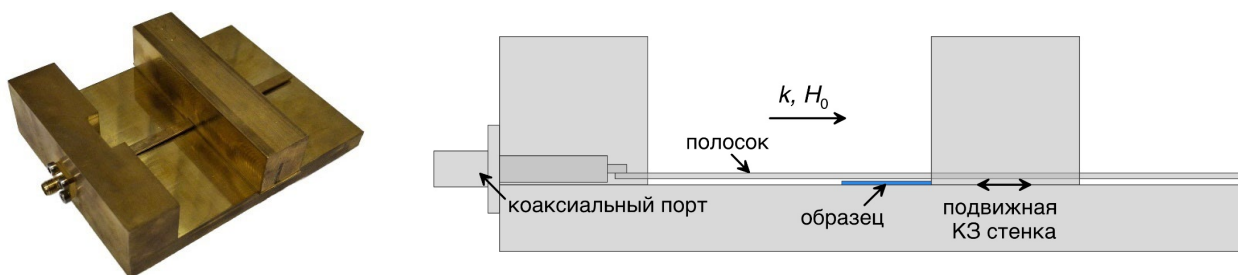


Рисунок 3 — Внешний вид (слева) и продольная схема (справа) короткозамкнутой полосковой измерительной ячейки

Калибровка выполнялась по трем положениям короткозамыкающей стенки. В низкочастотной части диапазона использовались смещения 0, 10 и 20 мм, а в высокочастотной — 0, 3,5 и 7,5 мм. Результаты двух калибровок объединялись на частоте $f_c = 3$ ГГц, выбранной с учетом фазового различия коэффициентов отражения в обоих наборах эталонов.

После калибровки измерялись коэффициенты отражения пустой ячейки и ячейки с образцом при нулевом и насыщающем внешнем магнитном поле. Нормировка на отклик пустой ячейки выполнялась отдельно для каждого значения магнитного поля, что позволяло уменьшить влияние изменений отклика измерительного тракта при перестройке внешнего магнитного поля.

На первом этапе обработки по отклику образца в насыщающем поле определялась эффективная диэлектрическая проницаемость участка линии. На втором этапе по результатам измерения при нулевом поле определялась

эффективная магнитная проницаемость. Затем с использованием вариационного расчета выполнялся переход от эффективной проницаемости участка линии к собственной магнитной проницаемости пленки.

Отдельно рассмотрена погрешность, связанная с предположением о равенстве магнитной проницаемости единице в насыщающем поле. Под остаточной магнитной проницаемостью далее понимается сохраняющееся отклонение комплексной магнитной проницаемости пленки от единицы в максимальном поле электромагнита. Предложен способ определения поправки по минимуму низкочастотной дисперсии эффективной диэлектрической проницаемости. Эффективность поправки проверена на пленке FeCo толщиной 1,2 мкм, ее учет улучшил согласие с результатами коаксиальных измерений.

Сочетание полной однопортовой калибровки непосредственно в измерительной ячейке на основе подвижной короткозамыкающей стенки и нормировки на отклик пустой ячейки позволило получать спектры комплексной магнитной проницаемости в диапазоне 0,1–20 ГГц. В ранее применявшейся методике [5], основанной на использовании эталонных образцов с известными параметрами, рабочий диапазон ограничивался паразитными резонансами измерительной ячейки и эталонов, а дополнительная погрешность была связана с неопределенностью электрофизических параметров эталонов. В работе [5] верхняя граница практически реализованного диапазона составляла около 8 ГГц.

Работоспособность разработанной методики была проверена на тонких магнитных пленках с различными электромагнитными свойствами. На рисунке 4 приведены частотные зависимости действительной и мнимой частей магнитной проницаемости пленки Co толщиной 17 нм, полученные полосковым методом и сопоставленные с результатами расчета по данным магнитостатических измерений.

Работоспособность методики также была проверена на пленках супермаллоя толщиной 160 нм, нанесенных на гибкую подложку. Полученные спектры магнитной проницаемости хорошо согласуются с результатами коаксиальных измерений и с независимой оценкой по магнитостатическим данным. Для такой оценки по петле гистерезиса, измеренной вдоль трудной оси намагничивания, было определено распределение полей магнитной анизотропии, которое затем было пересчитано в распределение резонансных частот с использованием формулы Киттеля. В предположении независимых высокочастотных резонансов была рассчитана частотная зависимость мнимой части магнитной проницаемости, на основе которой восстанавливалась ее действительная часть [9].

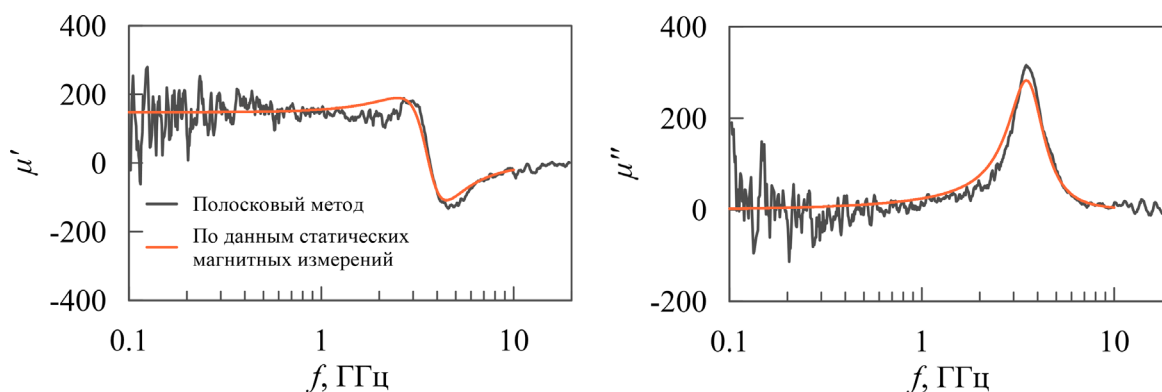


Рисунок 4 — Частотные зависимости действительной и мнимой частей комплексной магнитной проницаемости пленки Со толщиной 17 нм, полученные полосковым методом, в сравнении со спектром, рассчитанным по данным магнитостатических измерений

В **четвертой** главе представлена двухпортовая методика определения комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей композитных материалов при частичном заполнении поперечного сечения экранированной полосковой линии.

Конструкция измерительной ячейки, ее внешний вид с установленным образцом и поперечное сечение рабочей области представлены на рисунке 5. Исследуемый образец размещался внутри ячейки вблизи центрального полоскового проводника и занимал только часть ее поперечного сечения. Определение параметров материала выполнялось с учетом частичного заполнения с использованием вариационного метода.

Существенным элементом разработанной методики является калибровка непосредственно в рабочей измерительной линии по трем эталонным измерениям. Это позволяет учитывать неоднородности со стороны обоих портов, уменьшить влияние невоспроизводимости соединений и отказаться от отдельных калибровочных секций, точное соответствие которых рабочей ячейке трудно обеспечить на практике.

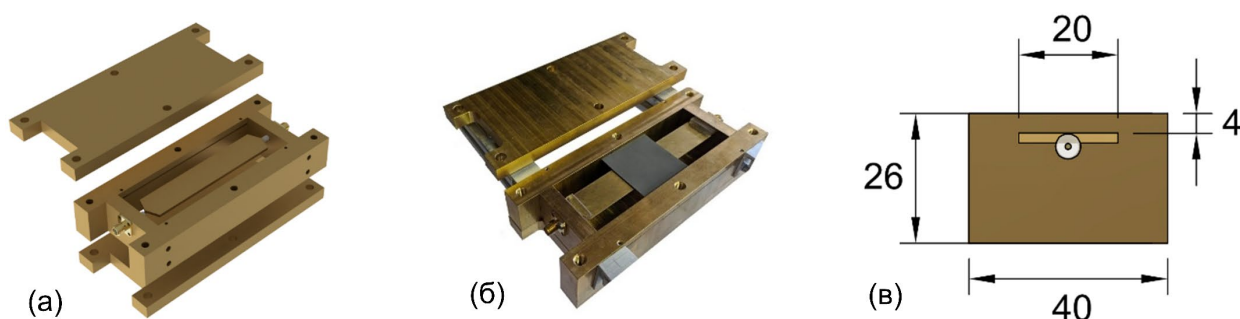


Рисунок 5 — Двухпортовая экранированная полосковая измерительная ячейка: конструктивная модель (а), внешний вид ячейки с установленным образцом (б) и поперечное сечение рабочей области с основными размерами (в мм) (в)

Для описания систематических погрешностей измерительный тракт представлялся в виде произведения каскадных матриц неоднородностей двух портов и эталонного или исследуемого участка линии:

$$\mathbf{T}_{mi} = \mathbf{E}_A \cdot \mathbf{T}_{xi} \cdot \mathbf{E}_B, \quad i = 1, 2, 3 \quad (7)$$

где $\mathbf{T}_{mi}$ — матрица, рассчитанная по измеренным S -параметрам i -го эталона, $\mathbf{T}_{xi}$ — известная матрица эталона, $\mathbf{E}_A$ и $\mathbf{E}_B$ — матрицы систематических погрешностей первого и второго портов.

Для определения двух матриц использовались три независимых эталонных измерения: пустая ячейка и два образца с известными диэлектрической и магнитной проницаемостями. Решение получено путем сведения исходной системы к задаче подобия матриц с последующей векторизацией и использованием произведения Кронекера. При этом не предполагалось равенство матриц погрешностей двух портов.

Экспериментальная проверка методики была выполнена на композитном материале на основе порошка железа Р-20. Измерялись образцы толщиной около 1,5 мм и длиной 10, 20 и 40 мм. На рисунке 6 приведено сравнение диэлектрической и магнитной проницаемостей, измеренных в полосковой линии, с результатами коаксиального измерения.

Расхождение значений магнитной проницаемости, полученных полосковым и коаксиальным методами, не превышало приблизительно 10 % в диапазоне до 3 ГГц. При дальнейшем увеличении частоты расхождение результатов возрастало, что связано с возбуждением высших мод и увеличением неоднородности поля в частично заполненной линии. Определение диэлектрической проницаемости оказалось более чувствительным к длине образца и неопределенности электромагнитных параметров эталонных образцов, используемых при калибровке.

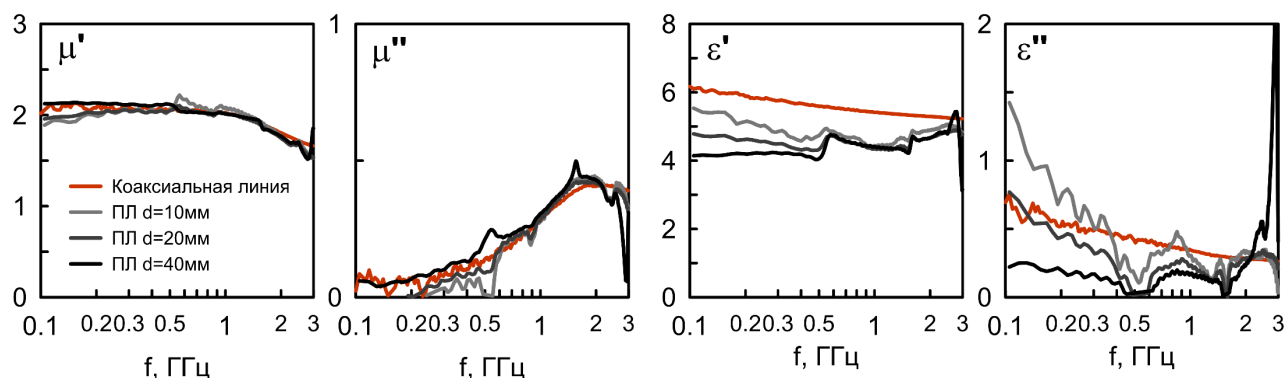


Рисунок 6 — Частотные зависимости комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей образцов композита Р-20 различной длины, полученные полосковым (ПЛ) и коаксиальным методами

В пятой главе рассмотрены две методики, реализуемые в открытой симметричной полосковой измерительной ячейке и предназначенные для исследования листовых материалов и периодических структур по образцам малого размера. Первая из этих методик представляет собой однопортовую двухпозиционную методику определения комплексных эффективных диэлектрической и магнитной проницаемостей по результатам двух измерений коэффициента отражения при различных положениях образца относительно короткозамыкающей стенки. Вторая методика предназначена для исследования поляризационно-чувствительных периодических структур с сосредоточенными нагрузками и основана на экспериментальном определении комплексного импеданса нагрузки по измерениям отдельных элементов структуры с последующим восстановлением коэффициента отражения периодической структуры. При этом параметры сосредоточенной нагрузки определяются экспериментально, а электромагнитные характеристики металлических полос и зазоров между ними рассчитываются отдельно с учетом взаимодействия соседних элементов периодической структуры. Однопортовая калибровка выполнялась непосредственно в измерительной ячейке по нескольким положениям подвижной короткозамыкающей стенки с использованием процедуры, аналогичной описанной в третьей главе.

Работоспособность первой методики была проверена на однородном магнитодиэлектрическом композите на основе карбонильного железа, допускающем исследование независимыми методами. На рисунке 7 приведены частотные зависимости модуля и фазы комплексного коэффициента отражения, полученные в симметричной полосковой ячейке, а также результаты, соответствующие коаксиальному и квазиоптическому методам. В области перекрытия рабочих диапазонов получено хорошее согласие результатов, что подтверждает корректность определения электромагнитного отклика однородного материала с использованием полосковой ячейки.

Возможность применения методики к пространственно неоднородным материалам была исследована на двумерном композите с плоскопараллельной периодической структурой. Такой материал представляет собой упорядоченный набор элементов композитного материала в форме плоских плиток, разделенных диэлектрическими зазорами. Исследованный образец был составлен из квадратных элементов композитного материала размером 10×10 мм, разделенных воздушными зазорами шириной 1 мм. В симметричной полосковой ячейке размещались два ряда по десять элементов — по одному ряду в каждом зазоре между центральным проводником и экраном линии.

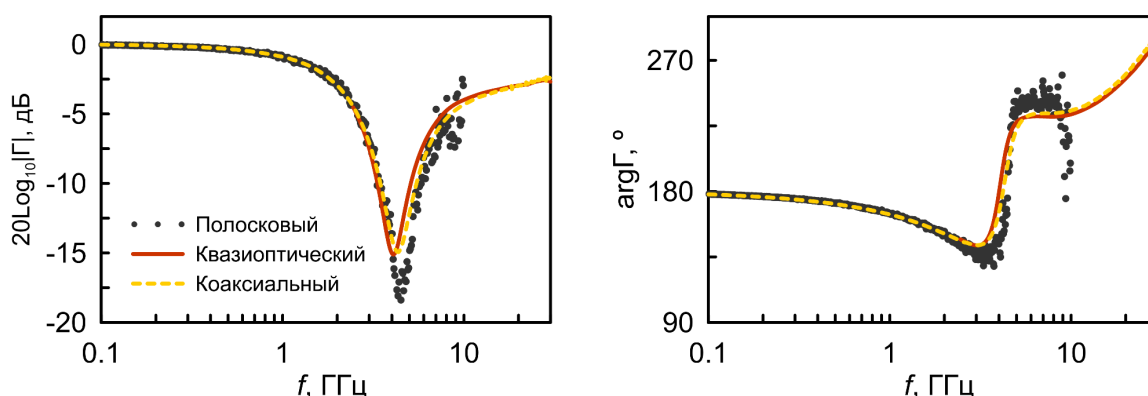


Рисунок 7 — Частотные зависимости модуля и фазы комплексного коэффициента отражения однородного композита на основе карбонильного железа, полученные полосковым, квазиоптическим и коаксиальным методами

Для определения двух независимых материальных параметров коэффициент отражения измерялся при двух положениях образца относительно короткозамыкающей стенки. Для проверки полученных результатов был изготовлен образец размером 10×10 элементов, параметры которого измерялись квазиоптическим методом в свободном пространстве [6]. На рисунке 8 приведено сравнение частотных зависимостей комплексных магнитной и диэлектрической проницаемостей, полученных двумя методами.

Полученные спектры хорошо согласуются между собой, что подтверждает возможность определения комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей периодически структурированных материалов в симметричной полосковой ячейке. Таким образом, полосковая ячейка позволяет существенно уменьшить необходимый для измерения размер образца, что особенно важно в низкочастотной области, где проведение измерений в свободном пространстве требует образцов большого поперечного размера.

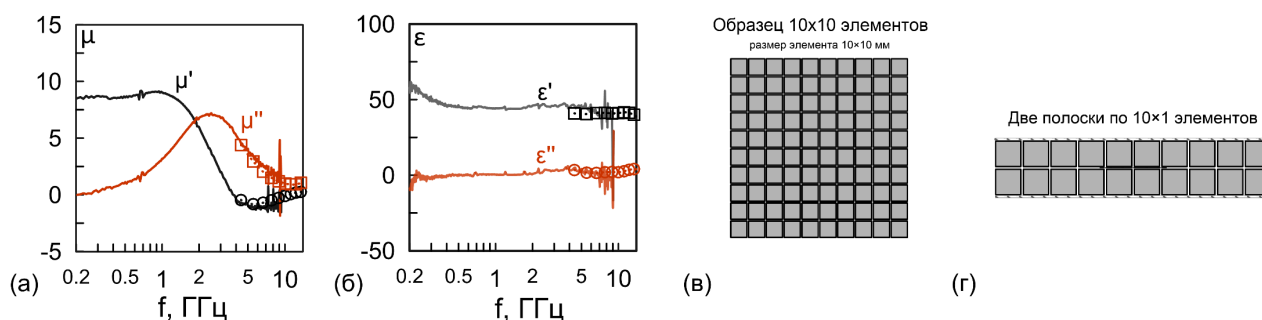


Рисунок 8 — Частотные зависимости действительной и мнимой частей магнитной (а) и диэлектрической (б) проницаемостей двумерного композита, а также схемы образцов, использованных при квазиоптическом измерении в свободном пространстве (в) и измерении в симметричной полосковой ячейке (г). Сплошными линиями показаны результаты полоскового метода, маркерами — результаты квазиоптического метода

Отдельный интерес представляют многослойные магнитные материалы, формируемые путем объединения тонких ферромагнитных пленок в многослойные ламинаты [10]. Такая структура позволяет увеличить содержание магнитной фазы и эффективный СВЧ магнитный отклик материала при сохранении малой толщины отдельных ферромагнитных слоев. Перспективным является также формирование периодических структур на основе многослойных пленочных элементов, геометрические параметры которых могут оказывать существенное влияние на их СВЧ магнитные свойства [11, 12].

Для исследования влияния размера элементов на СВЧ магнитный отклик была изготовлена периодическая структура на основе ламинатов из пленок железа. Ламинат толщиной 0,45 мм был сформирован из 25 пленочных слоев. Объемная доля магнитной фазы составляла около 2,8 %. Исследовались структуры, составленные из квадратных элементов размером 40×40, 20×20 и 10×10 мм, разделенных воздушными зазорами шириной 1 мм. Элементы меньшего размера получались последовательным разрезанием исходных образцов, что обеспечивало неизменность состава и технологии изготовления материала.

На рисунке 9 представлены частотные зависимости действительной и мнимой частей комплексной магнитной проницаемости исследованных структур. Установлено, что при уменьшении размера элементов максимум магнитных потерь систематически смещается в область более высоких частот, одновременно уменьшается его амплитуда и увеличивается ширина резонанса. Резонансная частота в исследованном диапазоне размеров линейно зависит от величины $1/L$, где L — размер квадратного элемента.

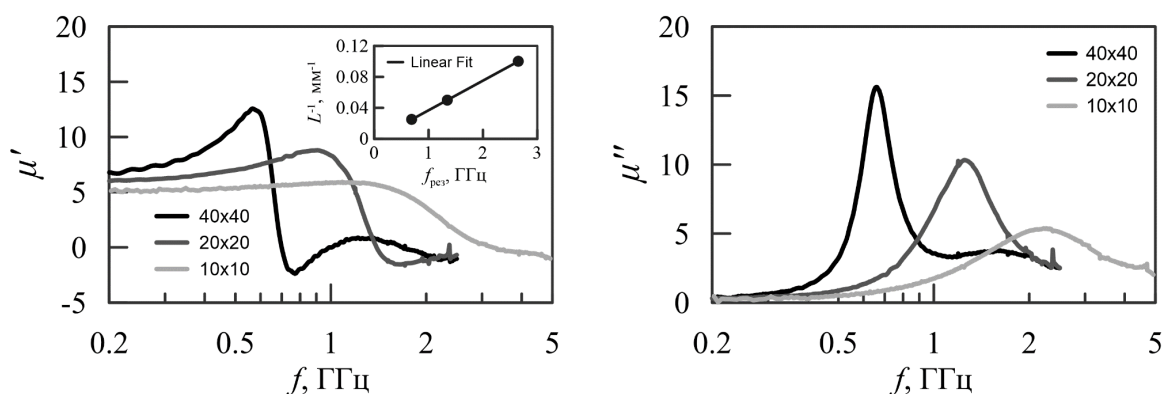


Рисунок 9 — Частотные зависимости действительной и мнимой частей комплексной магнитной проницаемости периодических структур из квадратных элементов ламинированного материала на основе пленок железа размером 40×40, 20×20 и 10×10 мм, разделенных воздушными зазорами шириной 1 мм. На вставке показана зависимость резонансной частоты от обратного размера элемента $1/L$ и ее линейная аппроксимация

Наблюдаемый размерный эффект может быть связан с возбуждением электродинамического резонанса в квадратных элементах периодической структуры. В приближении полуволнового резонанса его частота обратно пропорциональна поперечному размеру элемента, что согласуется с результатами измерений. Резонансное перераспределение индуцированных токов и электромагнитного поля в многослойной структуре может проявляться в виде резонансной дисперсии эффективной магнитной проницаемости. Полученные результаты демонстрируют возможность управления положением резонансной области СВЧ отклика ламинированного композита посредством изменения геометрических размеров его элементов.

Для исследования поляризационно-чувствительных периодических структур с сосредоточенными нагрузками разработана методика, основанная на измерениях компактных образцов в открытой симметричной полосковой ячейке. Ее применение позволяет уменьшить размеры исследуемого образца по сравнению с измерениями в свободном пространстве, для которых необходимо изготовление полноразмерного массива с большим числом нагруженных элементарных ячеек.

В разработанной методике полосковое измерение используется прежде всего для экспериментального определения комплексного импеданса сосредоточенной нагрузки. Параметры структурной части соответствующей периодической поверхности определяются отдельно с учетом взаимной электромагнитной связи отдельных элементов на основе численного моделирования. Экспериментальная проверка выполнена на резистивно-нагруженной полосовой структуре с SMD-резисторами типоразмера 0402 номиналом 510 Ом. При измерении два одинаковых элемента размещались симметрично по обе стороны центрального проводника, а металлические полосы ориентировались вдоль электрического поля основной волны.

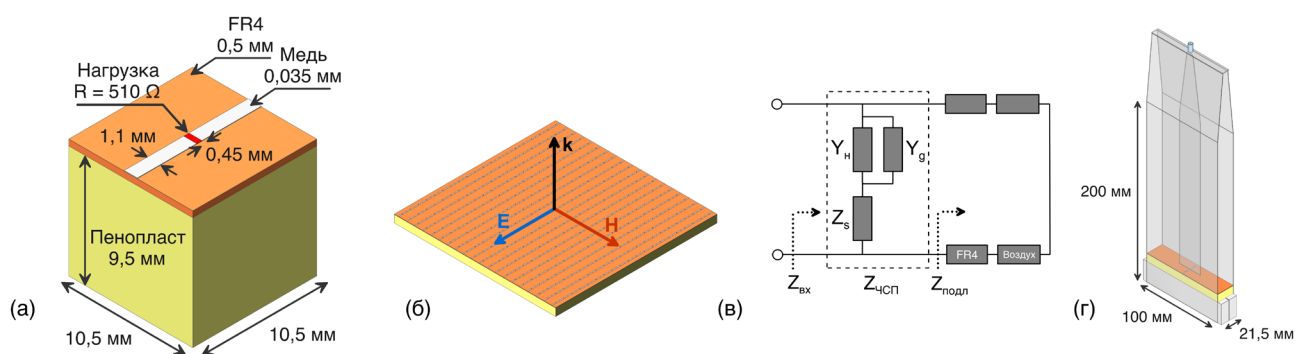


Рисунок 10 — Резистивно-нагруженная периодическая структура: (а) элементарная ячейка, (б) периодическая поверхность и ориентация падающей волны, (в) эквивалентная схема, (г) открытая симметричная полосковая измерительная ячейка

Электромагнитный отклик описывался эквивалентной схемой, в которой входной импеданс заземленной структуры соответствует параллельному соединению входного импеданса слоистой подложки $Z_{\text{подл}}$ и поверхностного импеданса периодически структурированного металлического слоя $Z_{\text{ЧСП}}$:

$$\frac{1}{Z_{\text{вх}}} = \frac{1}{Z_{\text{подл}}} + \frac{1}{Z_{\text{ЧСП}}}, \quad Z_{\text{ЧСП}} = Z_s + \frac{1}{Y_g + Y_n}, \quad (8)$$

где Z_s — комплексный последовательный импеданс структурной металлической части элемента, Y_g — собственная проводимость зазора, в который устанавливается нагрузка, $Y_n = 1/Z_n$ — проводимость установленной сосредоточенной нагрузки.

Для определения импеданса нагрузки измерялись нагруженное состояние и два состояния с короткозамкнутым и разомкнутым нагрузочным зазором. После пересчета коэффициентов отражения во входные импедансы и исключения вклада подложки параметры определялись последовательно:

$$Z_s = Z_{\text{ЧСП}}^{\text{КЗ}}, \quad Y_g = \frac{1}{Z_{\text{ЧСП}}^{\text{ХХ}} - Z_s}, \quad Y_n = \frac{1}{Z_{\text{ЧСП}}^{\text{наг}} - Z_s} - Y_g, \quad (9)$$

где $Z_{\text{ЧСП}}^{\text{КЗ}}$, $Z_{\text{ЧСП}}^{\text{ХХ}}$ и $Z_{\text{ЧСП}}^{\text{наг}}$ — импедансы металлического слоя структуры, определенные соответственно для короткозамкнутого, разомкнутого и нагруженного состояний.

Таким образом, экспериментально определяется комплексный импеданс установленного компонента, включающий влияние его корпуса, контактных площадок и монтажа. Для резистора 510 Ом определена паразитная емкость порядка 40 фФ. Ее учет заметно изменяет положение и глубину резонансных минимумов и улучшает согласие расчетного и экспериментального коэффициентов отражения. Поэтому при последующем восстановлении использовалась непосредственно измеренная частотная зависимость $Z_n(f)$, а представление нагрузки параллельным соединением сопротивления и емкости применялось только для физической интерпретации.

Параметры структурной части элемента поверхности существенно зависят от электромагнитного окружения. Поэтому параметры, полученные при измерении отдельных элементов в полосковой линии, нельзя непосредственно переносить на периодическую поверхность. При восстановлении ее отклика экспериментально определенный импеданс нагрузки объединялся с параметрами структурной части, рассчитанными численно для элементарной ячейки с периодическими граничными условиями:

$$Z_{\text{ЧСП}}^{\text{пер}} = Z_s^{\text{пер}} + \frac{1}{Y_g^{\text{пер}} + Y_n}, \quad \Gamma^{\text{пер}} = \frac{Z_{\text{вх}}^{\text{пер}} - \eta_0}{Z_{\text{вх}}^{\text{пер}} + \eta_0}, \quad (10)$$

где $\Gamma^{\text{пер}}$ — коэффициент отражения от периодической структуры, а η_0 — волновое сопротивление свободного пространства. Такой подход позволяет отдельно учитывать локальные свойства установленной нагрузки и взаимную связь элементов периодической решетки.

Применимость предложенной методики проверена полноволновым моделированием с заранее заданной RC -нагрузкой 510 Ом и 40 фФ. При изменении ширины нагрузочного зазора восстановленные значения сопротивления и емкости отличались от заданных на доли процента.

Восстановленный коэффициент отражения сопоставлен с полноволновым расчетом бесконечной периодической структуры и независимым квазиоптическим измерением образца размером 20×20 элементов (рисунок 11). Получено хорошее согласие восстановленной зависимости с результатами непосредственного полноволнового расчета и независимого квазиоптического измерения. Для оценки влияния неопределенности параметров полосковой ячейки на конечный результат дополнительно проведено статистическое моделирование методом Монте-Карло. Показано, что положение основного резонанса и ширина рабочей полосы сравнительно устойчивы к рассматриваемым вариациям, тогда как глубина резонансного минимума более чувствительна к ним.

Полученные результаты подтверждают возможность определения комплексного импеданса установленной сосредоточенной нагрузки по измерениям отдельных элементов структуры и последующего восстановления отклика периодической структуры в свободном пространстве. Методика применима к нагруженным структурам, для которых нагрузочный узел может описываться принятой эквивалентной схемой. В используемой установке верхняя граница рабочего диапазона составляет приблизительно 7 ГГц и определяется возбуждением первого высшего типа волны.

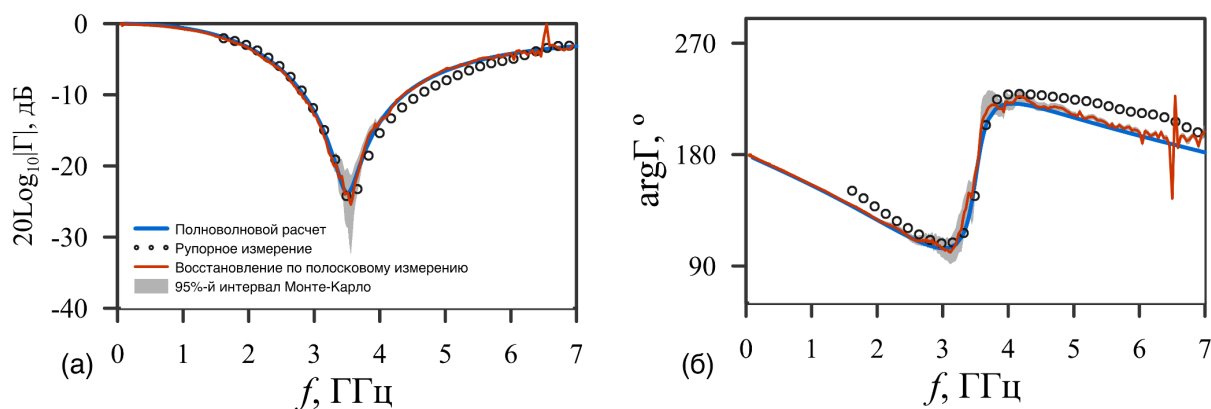


Рисунок 11 — Восстановленный коэффициент отражения периодической структуры в сравнении с полноволновым расчетом и рупорным измерением: (а) модуль, (б) фаза. Серая область — центральный 95%-й точечный интервал результатов моделирования методом Монте-Карло

В завершение главы рассмотрена возможность дальнейшего развития предложенной методики для исследования периодических структур с активными сосредоточенными нагрузками. Разработан и экспериментально исследован однопортовый нефостеровский элемент на основе широкополосного усилителя THS4303. По измеренному коэффициенту отражения определен его комплексный входной импеданс. В низкочастотной области выявлен участок отрицательного наклона реактивности, характерный для нефостеровского поведения. Полученные зависимости согласуются с результатами схмотехнического моделирования. Полученные результаты могут быть использованы при дальнейшем развитии метода для активно нагруженных периодических структур.

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

Основные результаты диссертации

1. Проведен анализ применимости квази-ТЕМ приближения при определении комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей образцов, частично заполняющих поперечное сечение полосковой измерительной линии. Предложены интегральные параметры A_E и A_H , характеризующие долю продольных компонент электрического и магнитного полей в объеме исследуемого образца. Для рассмотренных измерительных конфигураций установлена связь этих параметров с погрешностью определения ε и μ и получены практические оценки границ применимости квази-ТЕМ приближения. Получены зависимости предельной частоты применимости квази-ТЕМ приближения от толщины и электромагнитных параметров образца, позволяющие для заданной толщины оценивать верхнюю рабочую частоту измерения, а при заданной частоте — допустимую толщину образца.

2. Разработана однопортовая методика определения комплексной магнитной проницаемости тонких магнитных пленок в короткозамкнутой полосковой ячейке в диапазоне частот до 20 ГГц. В методике реализована полная однопортовая калибровка непосредственно в измерительной ячейке по трем положениям подвижной короткозамыкающей стенки, дополненная нормировкой на отклик пустой ячейки при соответствующем значении внешнего магнитного поля. Экспериментально получены спектры магнитной проницаемости пленок Co , супермаллоя и FeCo . Исследование пленки в плоском состоянии позволяет уменьшить влияние механической деформации на магнитный отклик, что особенно существенно для материалов с выраженной магнитострикцией. Предложен способ учета остаточной магнитной проницаемости тонких магнитных пленок в состоянии насыщения. Показано, что такая поправка особенно важна для пленок с достаточно большим эффективным полем магнитной анизотропии и позволяет уменьшить

систематическую погрешность определения спектра магнитной проницаемости. На примере пленки FeCo показано улучшение согласия с результатами коаксиальных измерений.

3. Разработана двухпортовая методика определения комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей композитных образцов при частичном заполнении поперечного сечения экранированной полосковой линии. Предложена калибровочная процедура по трем эталонным измерениям, позволяющая определять матрицы систематических погрешностей со стороны обоих портов и выполнять калибровку непосредственно в рабочей измерительной линии.

4. Разработана однопортовая двухпозиционная методика определения комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей листовых материалов и эффективных параметров двумерных периодических структур в симметричной полосковой ячейке по образцам малого размера. Работоспособность методики подтверждена на однородном композите на основе карбонильного железа сопоставлением с коаксиальными и квазиоптическими данными. На двумерном композите показана возможность определения эффективных ϵ и μ с использованием существенно меньшего образца, чем при измерении квазиоптическим методом в свободном пространстве.

5. Экспериментально установлена размерная зависимость СВЧ магнитного отклика периодических структур из квадратных элементов ламинированного материала на основе пленок железа. При уменьшении размера элементов с 40×40 до 10×10 мм максимум магнитных потерь систематически смещается в область более высоких частот, одновременно уменьшается его амплитуда и увеличивается ширина резонанса. В исследованном диапазоне размеров резонансная частота линейно зависит от обратного размера элемента. Полученный результат показывает возможность управления положением области магнитного резонанса посредством изменения геометрических размеров элементов периодической структуры.

6. Разработана методика определения комплексного импеданса сосредоточенной нагрузки и восстановления коэффициента отражения периодической структуры по полосковым измерениям компактного образца с раздельным учетом параметров нагрузки и структурной части периодической структуры. Восстановленные модуль и фаза коэффициента отражения согласуются с полноволновым расчетом и независимым измерением образца 20×20 элементов квазиоптическим методом в свободном пространстве.

Основные публикации по теме диссертации

1. **Ivanov P. A.**, Petrov D. A., Zezylina P. A., Komarov I. V., Osipov A. V., Maklakov S. S., Rozanov K. N. Accurate broadband permeability measurement of thin magnetic films in a short-circuited microstrip fixture // *Materials*. – 2026. – V. 19. – №. 11. – Art. 2294.
2. Buznikov, N. A., **Ivanov, P. A.**, Komarov, I. V., Lagarkov, A. N., Maklakov, S. A., Maklakov, S. S., Osipov A.V., Rozanov K.N., Shiryayev A.O., Zezyulina, P. A. Thickness Effect on Microwave Permeability of CoFeB Films on Flexible Substrate // *Magnetism*. – 2025. – V. 5. – №. 4. – P. 30.
3. **Иванов П.А.**, Бобровский С.Ю., Розанов К.Н., Петров Д.А. Применимость одномодового приближения при измерении магнитной проницаемости в полосковых линиях передачи // *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. – 2022. – Т. 86. – № 5. – С. 687–691.
4. **Иванов П.А.**, Петров Д.А., Розанов К.Н. Влияние близости короткозамыкателя к исследуемому образцу на измерение материальных параметров в квази-ТЕМ приближении в полосковой линии // *Современная электродинамика*. – 2023. – Т. 6. – № 4. – С. 20 – 29.
5. Князьков Р.А., Старостенко С.Н., Артемова А.В., Комаров И.В., Долматов А.В., Ширяев А.О., **Иванов П.А.**, Осипов А.В., Петров Д.А., Маклаков С.А., Зезюлина П.А., Бузников Н.А., Маклаков С.С. Стеклометаллический порошковый ферромагнитный материал для применения в композитах, предназначенных для СВЧ диапазона // *Современная электродинамика*. – 2024. – Т. 12. – № 4. – С. 21 – 29.
6. Стенищев И.В., **Иванов П.А.** Поглотитель на основе резистивно-нагруженной частотно-селективной поверхности: аналитическая модель и эксперимент // *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*. – 2026. – Т. 124. – №. 8. – С. 603–608.

Список цитированных источников

1. Pozar D. M. *Microwave Engineering*. – 4th ed. – Hoboken: Wiley, 2012.
2. Ghodgaonkar D. K., Varadan V. V., Varadan V. K. A free-space method for measurement of dielectric constants and loss tangents at microwave frequencies // *IEEE Trans. Instrum. Meas.* – 1989. – Vol. 38. – No. 3. – P. 789–793.
3. Nicolson A. M., Ross G. F. Measurement of the intrinsic properties of materials by time-domain techniques // *IEEE Trans. Instrum. Meas.* – 1970. – Vol. 19. – No. 4. – P. 377–382.
4. Weir W. B. Automatic measurement of complex dielectric constant and permeability at microwave frequencies // *Proc. IEEE*. – 1974. – Vol. 62. – No. 1. – P. 33–36.
5. Starostenko S. N., Rozanov K. N., Osipov A. V. A broadband method to measure magnetic spectra of thin films // *J. Appl. Phys.* – 2008. – Vol. 103. – No. 7. – Art. 07E914.

6. Семененко В. Н., Чистяев В. А., Политико А. А. и др. Стенд для измерений в свободном пространстве радиофизических параметров материалов в сверхширокой полосе сверхвысоких частот // Измер. техн. – 2019. – № 2. – С. 55–59.
7. Bhat B., Koul S. K. Unified approach to solve a class of strip and microstrip-like transmission lines // IEEE Trans. Microw. Theory Techn. – 1982. – Vol. 30. – No. 5. – P. 679–686.
8. Yamashita E., Mittra R. Variational method for the analysis of microstrip lines // IEEE Trans. Microw. Theory Techn. – 1968. – Vol. 16. – No. 4. – P. 251–256.
9. Han M., Rozanov K. N., Zezyulina P. A. et al. Effects of eddy current and dispersion of magnetic anisotropy on the high-frequency permeability of Fe-based nanocomposites // J. Magn. Magn. Mater. – 2015. – Vol. 383. – P. 114–119.
10. Iakubov I. T., Lagarkov A. N., Osipov A. V. et al. A laminate of ferromagnetic films with high effective permeability at high frequencies // AIP Adv. – 2014. – Vol. 4. – No. 10. – Art. 107143.
11. Iakubov I. T., Lagarkov A. N., Maklakov S. A. et al. Microwave permeability of composites filled with thin Fe films // J. Magn. Magn. Mater. – 2006. – Vol. 300. – No. 1. – P. 74–77.
12. Schoenstein F., Aublanc P., Pagès H. et al. Influence of the domain structure on the microwave permeability of soft magnetic films and multilayers // J. Magn. Magn. Mater. – 2005. – Vol. 292. – P. 201–209.