

Распределение магнитного поля в диэлектрических СВЧ резонаторах:
моделирование и измерение

Дмитриев Вадим Романович

Физический факультет. Практикум по электричеству и магнетизму. 3 семестр

Группа №18345, 2019

Научный руководитель:

к.ф.-м.н. Сырямина В. Н.

Аннотация

Целью работы являлось моделирование распределения магнитного поля в диэлектрическом резонаторе и его сравнение с распределением, полученным экспериментально. Диэлектрические резонаторы обширно используются в исследованиях методами спектроскопии ЭПР. Неоднородное распределение магнитного поля, характерное для всех резонаторов, может накладывать ограничения на допустимые размеры исследуемого образца в некоторых экспериментах ЭПР. Помимо этого, неоднородное магнитное поле может приводить к качественным и количественным ошибкам в анализе спектров ЭПР. Достижение более однородного поля в данной работе достигалось с помощью изменения формы диэлектрической вставки. В работе было проведено моделирование резонатора с тремя различными по форме диэлектрическими вставками и были получены значения резонансных частот мод колебаний $TE_{01\delta}$, подходящей для спектроскопии ЭПР, а также распределения магнитного поля в резонаторе. Для проверки корректности построенной модели были проведены измерения распределения магнитного поля и сравнение его с теоретическим распределением.

Сравнение длин области однородности магнитного поля показали, что магнитное поле имеет наибольшую степень однородности в резонаторе с диэлектрической вставкой в форме «гантели».

Ключевые слова: Диэлектрический резонатор, Метод пробного тела, Электронный парамагнитный резонанс (ЭПР), германат висмута, мода колебаний $TE_{01\delta}$.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Физический факультет
Кафедра общей физики
Дмитриев Вадим Романович
КУРСОВАЯ РАБОТА

**Распределение магнитного поля в диэлектрических СВЧ резонаторах:
моделирование и измерение**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №18345

Научный руководитель:

_____ к.ф.-м.н. Сырямина В. Н.

Оценка научного руководителя

« _____ » _____ 2019 г.

Преподаватель практикума

_____ к.ф.-м.н. Симонов А. А.

Оценка преподавателя практикума

« _____ » _____ 2019 г.

Куратор практикума:

_____ Итоговая оценка

_____ к.т.н. Астрелин В.Т.

« _____ » _____ 2019 г.

Новосибирск, 2019

Оглавление

Аннотация.....	3
Введение	4
Теоретическая часть.....	5
1. Метод пробного тела	5
2. Изменение формы диэлектрической вставки.....	6
Экспериментальная часть	7
1. Описание экспериментальной установки.....	7
2. Методика измерений	8
3. Моделирование профиля магнитного поля в резонаторе.....	8
4. Результаты измерений	10
5. Сравнение экспериментальных результатов с результатами моделирования	12
Заключение	13
Приложение А	14
Приложение В	15
Список литературы	15

Аннотация

Целью работы являлось моделирование распределения магнитного поля в диэлектрическом резонаторе и его сравнение с распределением, полученным экспериментально.

Диэлектрические резонаторы обширно используются в исследованиях методами спектроскопии ЭПР, причем данный тип резонаторов характеризуется малым эффективным объёмом и как следствие для создания переменного магнитного поля требуют меньшей подаваемой мощности. Неоднородное распределение магнитного поля, характерное для всех резонаторов, может накладывать ограничения на допустимые размеры исследуемого образца в некоторых экспериментах ЭПР. Помимо этого, неоднородное магнитное поле может приводить к качественным и количественным ошибкам в анализе спектров ЭПР. Достижение более однородного поля в данной работе достигалось с помощью изменения формы диэлектрической вставки.

В работе было проведено моделирование резонатора с тремя различными по форме диэлектрическими вставками и были получены значения резонансных частот мод колебаний $TE_{01\delta}$, подходящей для спектроскопии ЭПР, а также распределения магнитного поля в резонаторе. Для проверки корректности построенной модели были проведены измерения распределения магнитного поля и сравнение его с теоретическим распределением. Сравнение длин области однородности магнитного поля показали, что магнитное поле имеет наибольшую степень однородности в резонаторе с диэлектрической вставкой в форме «гантели».

Ключевые слова: Диэлектрический резонатор, Метод пробного тела, Электронный парамагнитный резонанс (ЭПР), германат висмута, мода колебаний $TE_{01\delta}$.

Введение

На сегодняшний день спектроскопия ЭПР широко применяется для исследования свойств различных веществ и диэлектрические СВЧ-резонаторы находят обширное применение в ней. Для возбуждения электронного парамагнитного резонанса необходимо воздействие на систему двух типов магнитных полей: постоянного и однородного магнитного поля B_0 и переменного магнитного поля B_1 , направленного перпендикулярно постоянному полю. С помощью диэлектрических резонаторов удастся получить существенный выигрыш в подводимой в резонатор мощности для создания магнитного поля B_1 . Но возникает проблема – в резонаторах это поле неоднородно, а теория ЭПР требует однородного распределения этого поля. Решение этой проблемы позволит повысить точность позиционирования «маленьких» образцов и исключить некоторые количественные ошибки для «длинных образцов». Можно выделить два способа её решения. Первый предполагает учитывать неоднородность распределения поля при обработке полученных спектров ЭПР. Однако, данный способ усложняет анализ экспериментальных данных. Второй способ решения проблемы – это создание резонаторов с большей областью однородности магнитного поля B_1 . В работе проводится моделирование и сравнение с экспериментальными данными профиля распределения магнитного поля в диэлектрических резонаторах со вставками различной формы.

В данной работе исследуются резонаторы для ЭПР-спектрометра (1), который работает в X-диапазоне длин волн (9 – 10 ГГц). Поэтому основным требованием к резонатору является положение частоты оптимальной моды для цилиндрического резонатора – $TE_{01\delta}$ в X-диапазоне (2 стр. 194-197). Так же важно, чтобы частота паразитных мод (т.е. мод отличных от $TE_{01\delta}$) находилась на оптимальном интервале от частоты нужной моды, поскольку спектрометр работает в определённом спектре частот, и близко расположенные паразитные моды могут поглощать существенную часть подаваемой в резонатор

мощности. Это может полностью испортить эксперимент, т.к. регистрируемый сигнал напрямую зависит от подаваемой в резонатор мощности.

Целью данной работы является сравнение распределения магнитного поля в резонаторе с различными диэлектрическими вставками, полученного при помощи экспериментального измерения с распределением, полученным при помощи моделирования. Для этого необходимо было разрешить следующие задачи:

1. Построение модели резонатора в среде, позволяющей рассчитать распределение магнитного поля (в данном случае программный пакет CST Studio SE) и последующий расчёт распределения магнитного поля в диэлектрическом резонаторе.
2. Выбор оптимального метода измерения относительного магнитного поля в резонаторе и создание экспериментальной установки, осуществляющей данный метод.
3. Сравнение полученных распределений теоретически и экспериментально поля B_1 в резонаторе с диэлектрическими вставками различной формы.

В данной работе проводятся исследования трёх диэлектрических вставок для цилиндрического резонатора различной формы. Первая имеет классическую цилиндрическую форму, вторая изготовлена в форме «гантели» и последняя в форме «песочных часов» (далее эти формы будут представлены). Все три диэлектрические вставки изготовлены из германата висмута (диэлектрическая проницаемость $\sim 15\text{--}16$).

Теоретическая часть

1. Метод пробного тела

В основе проводимых измерений лежит метод пробного тела, описанный Гинзтоном (3 стр. 448). Суть метода заключается в том, что при помещении в резонатор металлического сферического тела, объём которого существенно меньше объёма, резонансная частота резонатора изменяется, в зависимости от величины модуля электрического и магнитного полей.

А поскольку в экспериментах ЭПР спектроскопии требуется наличие только магнитного поля вдоль оси резонатора, сдвиг частоты зависит только от величины магнитного поля в точке, в которую помещено пробное тело. Введя величину:

$$B_1^2 = \frac{B^2}{2U} \quad (1)$$

Где: U – значение средней энергии, запасённой в резонаторе.

Можно записать зависимость квадрата магнитного поля в точке, в котором находится пробное тело, от резонансной частоты:

$$B_1^2 = \frac{\nu^2 - \nu_0^2}{\nu_0^2} \cdot \frac{1}{2\pi a^3} \quad (2)$$

Где: ν_0 – резонансная частота резонатора без пробного тела внутри; ν – резонансная частота, резонатора с пробным телом внутри; a – радиус пробного тела. Из этой формулы следует, что для вычисления абсолютного значения нам требуется знать энергию, запасённую в резонаторе. С другой стороны, мы можем узнать относительное распределения магнитного поля, в области где отсутствует электрическое поле, зная лишь зависимость резонансной частоты от положения пробного тела. Для этого в расчётах не нужно учитывать размер пробного тела. Но важно соблюсти условие, при котором справедлива данная формула, пробное тело должно быть очень мало, относительно размера резонатора.

2. Изменение формы диэлектрической вставки

Обычно для ЭПР спектроскопии используют цилиндрические резонаторы с диэлектрической вставкой в форме цилиндра. Но распределение магнитного поля вдоль оси резонатора в таком резонаторе сильно неоднородно. Для достижения более однородного распределения магнитного поля предлагается изменить форму диэлектрической вставки. Как известно тело с большой диэлектрической проницаемостью ϵ способен сильно повлиять на распределение электрического поля, а поскольку с переменным электрическим полем всегда связано переменное магнитное поле, то

распределение магнитного поля в области диэлектрика тоже претерпит изменения.

Распределение электромагнитных полей в резонаторе при изменении формы диэлектрической вставки удаётся рассчитать лишь при помощи вычислительных методов. Правда, основную сложность составляет не расчёт, а предсказание правильной формы вставки, которая создаст оптимальное распределение поля B_1 , и удачное положение паразитных мод в резонаторе.

Экспериментальная часть

1. Описание экспериментальной установки

Поскольку метод пробного тела требует измерения сдвига резонансной частоты, основным измерительным прибором является векторный рефлектометр ПЛАНАР САВАН R140, который позволяет следить за отношением амплитуд падающей и отраженной волны, посылаемый рефлектометром – S_{11} -параметром резонатора в диапазоне частот от 85 до 14000 МГц, а также обеспечивает высокую точность измерений (относительная погрешность измерения частоты составляет $\pm 5 \cdot 10^{-6}$ (4))

В качестве пробного тела использовался шарик от шариковой ручки диаметром 0.70 ± 0.01 мм. Такой выбор обусловлен тем, что такой шарик имеет подходящий размер и правильную сферическую форму. Шарик помещался в длинный стеклянный капилляр так, чтобы капилляр пронизывал резонатор во всех положениях пробного тела внутри резонатора. На рис. 1 изображена установка, позволяющая с шагом в 1 мм перемещать капилляр с пробным телом вдоль вертикальной оси.

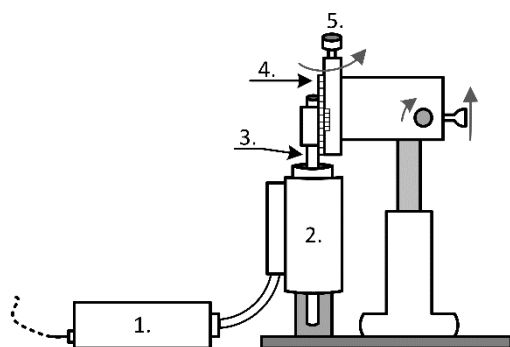


Рис. 1. Схематическое изображение экспериментальной установки: 1) САВАН R140; 2) Цилиндрический резонатор; 3) Стеклянный капилляр с пробным телом; 4) Измерительная шкала (цена деления 1 мм); 5) Регулятор высоты капилляра; 6) регуляторы горизонтального положения.

Резонатор состоит из цилиндрического металлического экрана, тефлоновых поддержек и диэлектрической вставки, характерно изменяющей распределение электромагнитных полей в резонаторе, его модель представлена на Рис. 2.

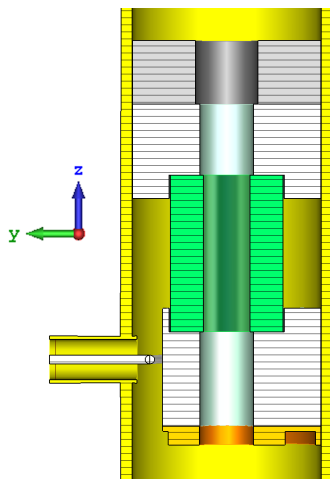


Рис. 2. Модель диэлектрического резонатора с цилиндрической диэлектрической вставкой в разрезе. Сверху вниз: 1) Алюминиевый экран; 2) верхняя тефлоновая поддержка; 3) Цилиндрическая диэлектрическая вставка; 4) Нижняя тефлоновая поддержка и элемент связи; 5) латунный экран.

2. Методика измерений

Поскольку метод пробного тела требует вычисления резонансной частоты резонатора для каждого положения пробного тела в нём очень удобно знать зависимость S_{11} -параметра резонатора от частоты. Поэтому при помощи векторного рефлектометра CABAN R140 строится зависимость отношения амплитуд отраженного сиг S_{11} -параметра от частоты выделяется мода TE_{016} , для каждого положения пробного тела в нём. Полученные значения частот искомой моды представлены в Табл. 1. После этого в резонатор погружается стеклянный капилляр так, чтобы пробное тело было вне объёма резонатора, а капилляр был полностью погружен весь в объём резонатора. Далее пробное тело вдвигается в резонатор, координаты пробного тела и резонансная частота измеряются для каждого положения пробного тела.

3. Моделирование профиля магнитного поля в резонаторе

Профиль магнитного поля исследовался для трёх диэлектрических вставок различной формы, которые представлены на Рис. 3. Размеры вставок представлены в приложении В, Рисунок 4. Вставки формы как на рис. а)

используются в коммерческих резонаторах (например, в резонаторах фирмы Bruker).

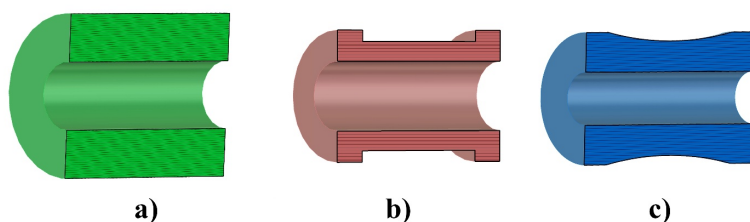


Рис. 3. Формы исследуемых диэлектрических вставок: а) цилиндрическая; б) «гантель»; с) «песочные часы».

Исследуемые диэлектрические вставки и резонатор были смоделированы в программе CST Studio SE. На Рис. 2 представлено устройство моделируемого резонатора. После построения модели для резонатора рассчитывался S_{11} -параметр системы. А также в центр резонатора помещался зонд, с помощью которого рассчитываются зависимости векторов магнитного и электрического поля от частоты колебаний в резонаторе. Это необходимо для определения частоты моды колебаний $TE_{01\delta}$, для которой далее будет вестись расчёт полей $\vec{B}$ и $\vec{E}$ во всём объеме резонатора.

С помощью зависимости S_{11} -параметра от частоты определяются локальные экстремумы (значения резонансных частот). Для каждой частоты рассматриваются проекция на аксиальную ось резонатора (z , Рис. 2) и абсолютные значения магнитного и электрического полей, полученные с помощью зонда. Нас интересует частота, при которой магнитное поле имеет максимальное по модулю значение и направлено вдоль оси z , а модуль электрического поля имеет минимум, т.е. мода колебаний $TE_{01\delta}$. В Табл. 1 представлены частоты данной моды для трёх диэлектрических вставок.

Табл. 1. Значения резонансных частот моды $TE_{01\delta}$ электромагнитных колебаний в резонаторе.

	Тип вставки	Цилиндрическая	«Гантель»	«Песочные часы»
Теория	$\nu_{\text{эпр}}$, ГГц	7.57	10.61	9.56
Эксперимент	$\nu_{\text{эпр}}$, ГГц	7.50	10.76	9.60

На Рис. 4 и Рис. 5 представлены визуализации теоретических расчётов компонент магнитного и электрического полей соответственно, направленных вдоль аксиальной оси резонатора. Здесь наглядно показано как изменение формы диэлектрической вставки влияет на распределение электрического и магнитного полей в резонаторе.

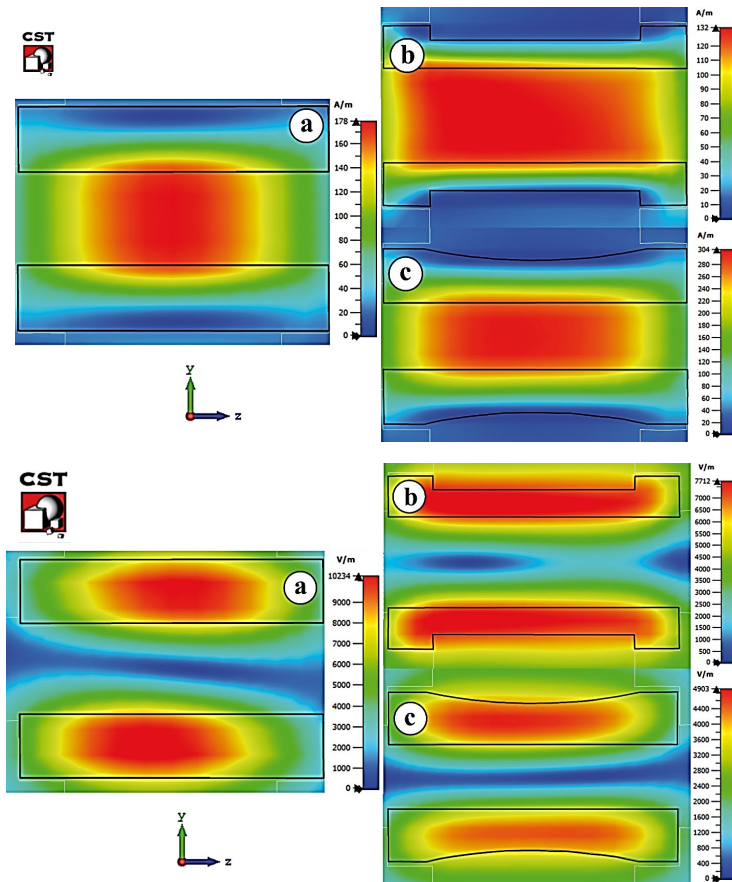


Рис. 4. Визуализация модуля магнитного поля в резонаторе с диэлектрическими вставкой в форме: а) цилиндра; б) «гантели»; в) «песочных часов».

Рис. 5. Визуализация модуля электрического поля в резонаторе с диэлектрическими вставкой в форме: а) цилиндра; б) «гантели»; в) «песочных часов».

4. Результаты измерений

На Рис. 6 (а) представлены зависимости резонансной частоты от положения пробного тела в резонаторе с цилиндрической диэлектрической вставкой. Для других вставок полученные зависимости приведены в приложении А.

Частотный профиль изначально имеет некоторый наклон, который корректируется путём вычитания базовой линии. Для базовой линии можно сделать линейную аппроксимацию по крайним значениям (когда пробное тело находится вне объёма резонатора), поскольку частоты измеряются в очень узком диапазоне, после вычесть полученные значения из исходного частотного профиля.

Поскольку нас интересует относительное распределение магнитного поля в резонаторе введём безразмерную величину:

$$A^2(z) = \frac{\nu^2(z) - \nu_0^2}{\nu_0^2} \quad (3)$$

Где: ν – резонансная частота, когда пробное тело находится на расстоянии z от центра резонатора, ν_0 – резонансная частота колебаний в резонаторе без пробного тела. Данная величина после вычисления всех значений нормируется на максимальное и в итоге получается нормированная функция распределения магнитного поля на аксиальной оси резонатора:

$$f(z) = A/\max(A) \quad (4)$$

Вид данной функции для конкретного распределения поля далее будет называться профилем магнитного поля. На Рис. 6 (b) (красные треугольники). Полученные значения $f(z)$ аппроксимировались полиномом 9ой степени, график аппроксимированной функции $f(z)$ на рисунке обозначен красной линией. Аналогично были построены распределения для других диэлектрических вставок, их графики представлены в приложении А, Рисунок 1 и Рисунок 2.

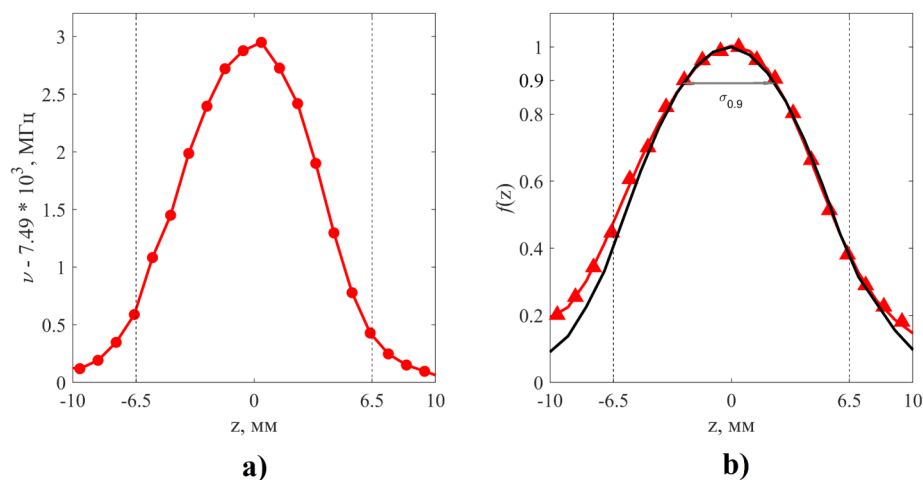


Рис. 6. Красным обозначены экспериментальные зависимости $f(z)$ для цилиндрической диэлектрической вставки: а) резонансной частоты; б) относительного значения поля B_1 от положения пробного тела в резонаторе. Чёрным на рис. б) представлен рассчитанный моделированием профиль поля B_1 .

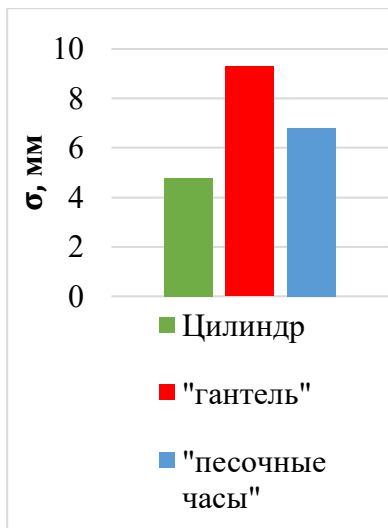


Рис. 7 Длина области однородности для вставок различной формы.

Так же для количественного сравнения однородности поля в центре резонатора для каждой вставки была рассчитана длина области однородности на уровне $0.9 \sigma_{0.9}$ (т.е. область где магнитное поле отличается не более чем на 10% от максимального значения, Рис. 6 (b)).

Величина $\sigma_{0.9}$ имеет прикладное значение - в резонаторах с более однородным магнитным полем повышается точность позиционирования «маленьких» образцов, а для «длинных» образцов понижаются количественные ошибки измерения.

На Рис. 7 показано сравнение области однородности на уровне 0,9 для резонаторов со вставками различной формы. Видно, форма «гантель» оказалась наиболее подходящей для экспериментов спектроскопии ЭПР, в которых требуется высокая однородность магнитного поля.

5. Сравнение экспериментальных результатов с результатами моделирования

На Рис. 6 (b) приведено сравнения теоретической зависимости $f(z)$ и экспериментальной. Для других диэлектрических вставок сравнения профилей представлены в приложении А.

Для оценки расхождения теоретических и экспериментальных данных рассчитывалась зависимость:

$$\Delta(z) = |f_{\text{теор}} - f_{\text{эксп}}|(z) \quad (5)$$

Для распределения нормированного магнитного поля исследуемых диэлектрических вставок. Далее был вычислен корень среднеквадратичного отклонения для каждой функции, значение которого используется как мера соответствия расхождения теоретических данных с экспериментальными. В

Табл. 2.

Табл. 2. Значения корня среднеквадратичного отклонения экспериментальных значений относительного поля от теоретических.

Форма вставки	Цилиндр	«Гантель»	«Песочные часы»
RMSD, %	2.14	5.77	2.03

Заключение

Целью данной работы являлось измерение профиля магнитного поля в диэлектрическом резонаторе для диэлектрических вставок различной формы и сравнение его с полученным в ходе моделирования профилем поля.

В ходе выполнения данной курсовой работы были получены следующие результаты:

- 1) Собрана установка, позволяющая реализовать измерение профиля магнитного поля с помощью метода пробного тела. Было получено распределения магнитного поля на оси цилиндрического резонатора для трёх различных диэлектрических вставок. Также для каждой вставки был рассчитана длина области однородности на уровне 0.9 магнитного поля. Наибольшее значение этой величины оказалось у вставки в форме «гантели».
- 2) В программном пакете CST Studio SE была разработана модель резонатора и исследуемых диэлектрических вставок. После был проведён расчёт распределения магнитного поля на оси резонатора.
- 3) Было проведено сравнение теоретического распределения магнитного поля с практическим распределением, и вычислено значения корня среднеквадратичного отклонения функции расхождения. Максимальное отклонение оказалось у диэлектрической вставки в форме гантели и составило 6%

Приложение А

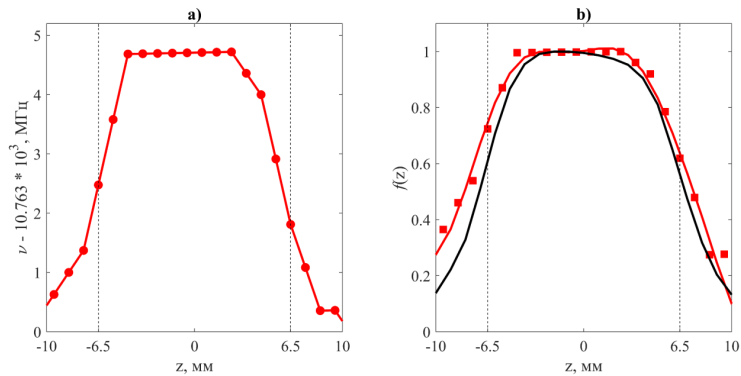


Рисунок 1. Красным обозначены экспериментальные зависимости для диэлектрической вставки в форме «гантель»: а) резонансной частоты; б) относительного значения поля В1 от положения пробного тела в резонаторе. Чёрным на рис. б) представлен рассчитанный моделированием профиль поля В1.

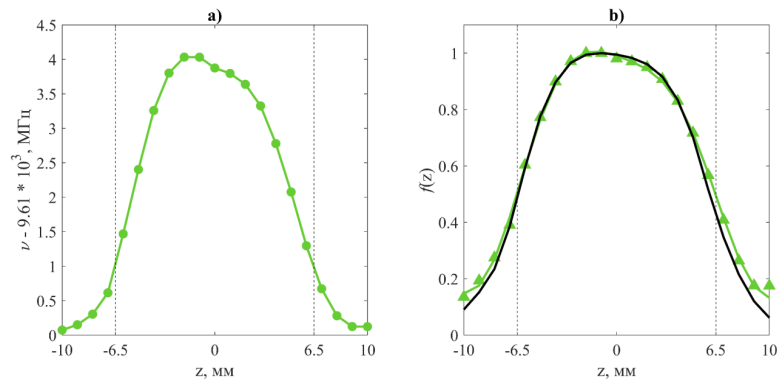


Рисунок 2. Зелёным обозначены экспериментальные зависимости для диэлектрической вставки в форме «песочные часы»: а) резонансной частоты; б) относительного значения поля В1 от положения пробного тела в резонаторе. Чёрным на рис. б) представлен рассчитанный моделированием профиль поля В1.

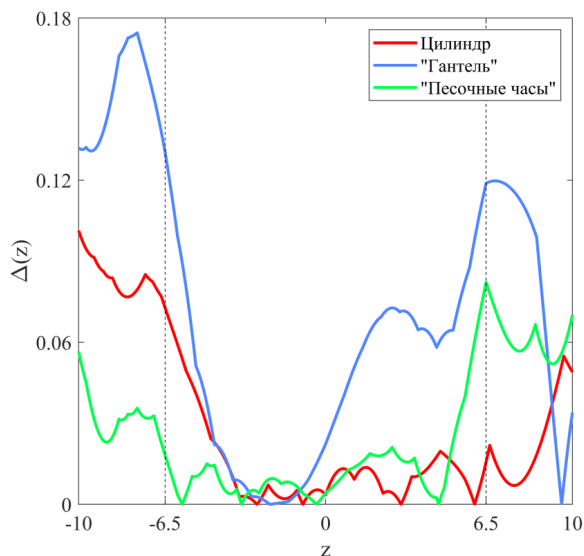


Рисунок 3. График функции отклонения функции расхождения теоретических и экспериментальных данных для исследуемых форм диэлектрических вставок.

Приложение В

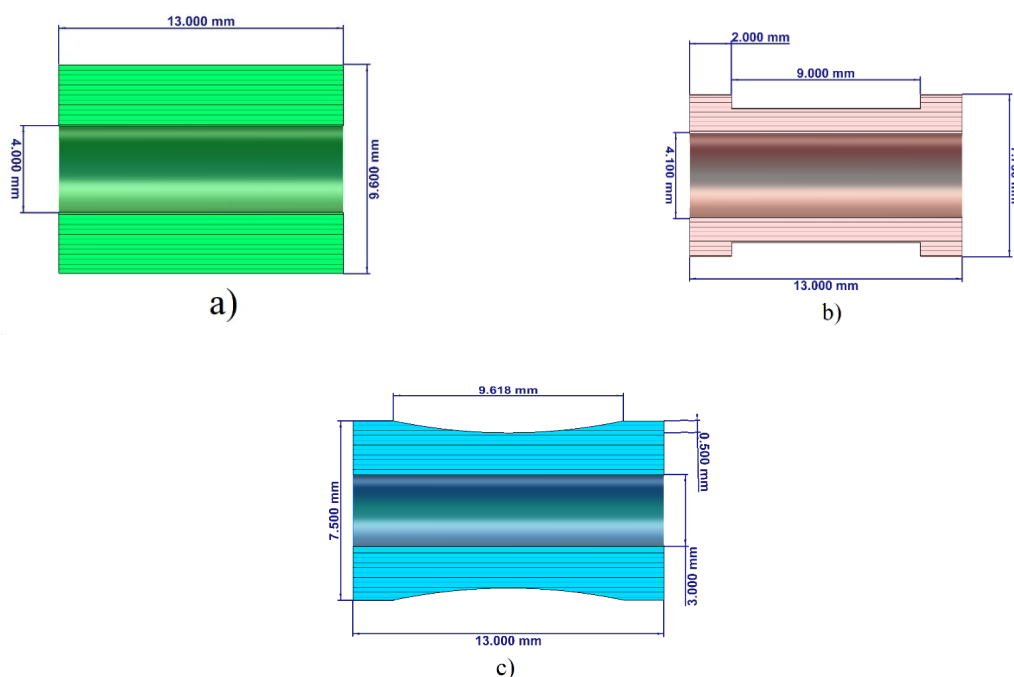


Рисунок 4. Размеры диэлектрических вставок в форме: а) цилиндра; б) «гантели»; в) «песочных часов»

Список литературы

1. **Bruker.** Компания Bruker. [В Интернете] [Цитировано: 08 декабрь 2019 г.] <https://www.bruker.com/ru/products/mr/epr/elexsys/e580.html>.
2. *Electron Paramagnetic Resonance Instrumentation.* **Edwrd Reijerse, Anton Savitsky.** 6, 2017 г., eMagRes, стр. 187-206.
3. **Ginzton, Edward L.** *Microwave measurements.* New York : McGraw-Hill, 1957.
4. **Planar.** Planar, Caban R140. [В Интернете] [Цитировано: 4 Декабрь 2019 г.] http://www.planarchel.ru/Products/Measurement%20instrument/r-series/Operating_Manual_RVNA_Part1_Rus_2018-06-04.pdf/view.