

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

Физический факультет

Кафедра общей физики

Пластинина Дарья Михайловна

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Измерение распределения электромагнитного поля в
прямоугольном СВЧ резонаторе**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №19311

Научные руководители:

д.ф.-м.н. Гришин Ю. А.

Подшивалов А.И.

Оценка научных руководителей

«_____» _____ 20__ г.

Преподаватель практикума

Руменских М.С.

Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ 20__ г.

Куратор практикума:

Итоговая оценка

к.т.н. Астрелин В.Т.

«_____» _____ 20__ г.

г. Новосибирск, 2020 год

Оглавление

Аннотация.....	1
Введение	2
Теоретическая часть.....	3
Экспериментальная часть	5
<i>Описание экспериментальной установки</i>	6
Результаты теоретической части.....	8
Результаты экспериментальной части	10
Выводы	12
Библиографический список	13
Приложение	14

Аннотация

Целью работы являлось изучение распределения электромагнитного поля в прямоугольном СВЧ резонаторе. Для достижения этой цели была собрана установка, с помощью которой было измерено распределение электромагнитного поля при резонансной частоте в объёме резонатора методом пробного тела. Проведено сравнение теоретических и экспериментальных измерений и проверена возможность использования метода пробного тела для исследования распределения электромагнитного поля. Расчётные характеристики получены при помощи моделирования в программе CST Studio Suite 2018 (Student Edition). Произведен анализ возможных источников погрешностей.

Ключевые слова: резонатор, метод пробного тела, распределение поля

Введение

Объемный резонатор (далее – резонатор) – элемент линии передачи высокочастотного электромагнитного излучения, используемый обычно в качестве селективного элемента для выделения полезного сигнала на определенной частоте в устройствах передачи информации либо для получения определенной структуры высокочастотного электромагнитного поля (например, в ускорителях заряженных частиц, приборах магнитного резонанса и т.п.). Объемному резонатору присущ спектр частот собственных колебаний и соответствующие им моды (виды) колебаний. Каждой моде соответствует своя структура электрических и магнитных полей в резонаторе, обусловленная явлением стоячих волн - периодическим изменением амплитуды напряженности электрического и магнитного полей, вызванным интерференцией падающей и отражённой волны. В качестве регистрирующего элемента в ЭПР-спектрометре (спектрометре электронного парамагнитного резонанса) часто используют прямоугольный резонатор с модой колебаний TE_{102} , имеющий максимум СВЧ-магнитного поля в середине рабочего объема, что позволяет размещать здесь образцы исследуемого вещества различных форм и размеров, контролировать температуру образца, производить его облучение светом, рентгеновским излучением или потоком заряженных частиц. При этом электрическое СВЧ поле в месте расположения образца должно быть близко к нулю, что требуется для изучения проводящих (например, биологических) объектов. Достоверность данных в ходе такого исследования напрямую зависит от параметров самого резонатора. Поэтому целью работы является изучение распределения электромагнитного поля в прямоугольном СВЧ резонаторе. Было проведено сравнение экспериментально полученных данных с теоретическими вычислениями для прямоугольного СВЧ резонатора. Количественные расчёты не приводятся из-за недостаточной производительности вычислительной техники и больших погрешностей экспериментальных измерений. Актуальность работы заключается в том, что

основой любого исследования является необходимость знания параметров используемого и вновь разрабатываемого экспериментального оборудования, что означает, что от изучения распределения полей в резонаторе зависит будущее ЭПР-спектроскопии, а значит, и науки в целом.

Теоретическая часть

Вытекающее из уравнений Максвелла векторное уравнение

$$\vec{E} = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \vec{H},$$

где $E = E_y \exp(j\omega t - \gamma z)$, $H = H_x \exp(j\omega t - \gamma z)$, описывает плоскую волну.

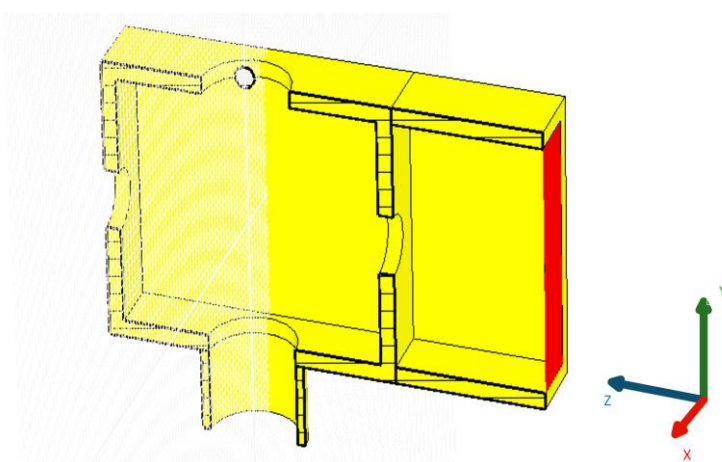


Рис. 1. Общий вид прямоугольного резонатора в декартовой системе координат

Волна такой структуры, или мода, будет распространяться между стенками резонатора (в направлении оси волновода), при этом вектор электрического поля \vec{E} будет им перпендикулярен. Всего существуют три типа волн, распространяющихся по линиям СВЧ: поперечные электромагнитные волны (ТЕМ), поперечные электрические (ТЕ) и поперечные магнитные (ТМ). Свойства, характерные для них:

$$ТЕМ: H_z = E_z = 0$$

$$ТЕ: E_z = 0, H_z \neq 0$$

$$ТМ: H_z = 0, E_z \neq 0$$

Волны типа ТЕМ не распространяются вдоль полых труб (волноводов) [1], поэтому при описании прямоугольного резонатора мы рассматриваем только поведением ТЕ и ТМ-волн.

Внутри полости резонатора возникает стоячая волна – явление интерференции волн, распространяющихся в прямом и обратном направлении после отражения от внутренних стенок. В стоячих волнах перенос энергии ослаблен или его вообще нет, из-за чего происходит постепенное накопление энергии, поступающей из волновода в резонатор. Объём резонатора конечен, поэтому волновой вектор может принимать лишь определенные значения, порождая моды колебаний.

Чтобы исследовать распределение электромагнитного поля в резонаторе, необходимо достичь его изменения. Добиться этого можно разными способами, к примеру, использованным нами в работе методом пробного тела [2,3]. Изменение электрического и магнитного поля позволяет определить их величины вдоль осей резонатора по сдвигу резонансной частоты, вызванного вводом в полость резонатора диэлектрического или металлического тела.

Изменение резонансной частоты определяется формулой:

$$\frac{\nu_0^2 - \nu^2}{\nu_0^2} = 3\left(E_0^2 - \frac{1}{2}H_0^2\right) \frac{4\pi r^3}{3},$$

где ν_0 – невозмущённая резонансная частота, ν – смещённая (возмущённая) резонансная частота, E_0, H_0 – относительное изменение электрического и магнитного полей, r – радиус шарика. При исследовании магнитного поля в резонаторе методом пробного тела металлический шарик перемещали через область с минимальным электрическим полем, тогда как при исследовании электрического поля – диэлектрический шарик через область с минимальным магнитным полем. Измерения проводились, в основном, в прямоугольном резонаторе с модой колебаний соответствует TE_{102} моде. Тогда из предыдущей формулы получаем изменения магнитного и электрического полей:

$$H_0^2 = \frac{v_0^2 - v^2}{v_0^2} \frac{1}{2\pi r^3}.$$

$$E_0^2 = \frac{v_0^2 - v^2}{v_0^2} \frac{1}{4\pi r^3}.$$

Поляризованная магнитная индукция прямо пропорциональна величине изменения магнитного поля:

$$B_1^2 = \mu^2 H^2 = \left(\frac{Q_0 W}{\pi v_0} \right) \mu H_0^2 = \frac{\mu_0 \cdot Q_0 \cdot W}{2\pi^2 \cdot r^3 \cdot v_0} \cdot \frac{v^2 - v_0^2}{v_0^2}, \quad (1)$$

где W – мощность, подводимая к резонатору, Q_0 – собственная добротность резонатора, μ – магнитная проницаемость. Добротность резонатора может быть найдена как:

$$\frac{1}{2} Q_0 = \frac{v_0}{\Delta v}, \quad (2)$$

где Δv – ширина полосы пропускания резонатора.

Экспериментальная часть

Измерения проводились с помощью осциллографа DSOS054A S-series (Keysight, США) и векторного рефлектометра CABAN-R140 (PLATAN Ltd., Россия). Рефлектометр CABAN в каждом положении пробного тела фиксирует отношение амплитуд падающих и отраженных в резонаторе волн частотного диапазона от 8 до 14 ГГц. На резонансных частотах резонатора поглощение энергии СВЧ-волны максимально, тогда как на нерезонансных частотах это поглощение мало и вызвано потерями энергии при отражении в кабеле и разъёмах, соединяющих рефлектометр с резонатором.

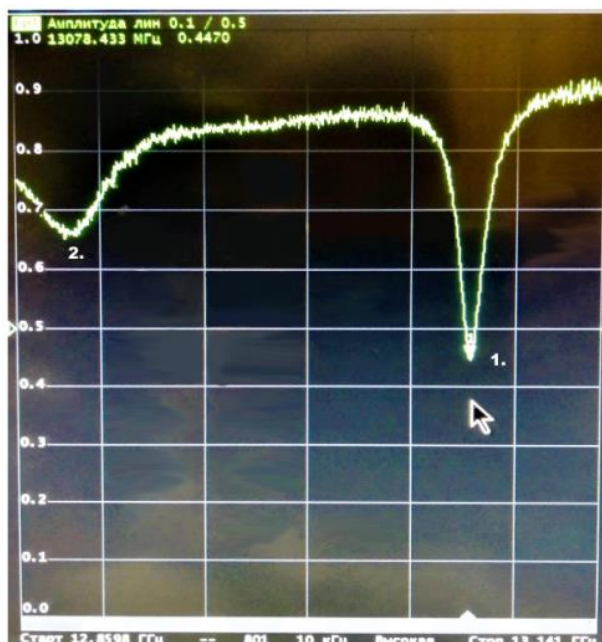


Рис. 2. Зависимость (в линейной шкале) коэффициента отражения (s_{11}) от частоты, полученная рефлектометром R140: 1. – резонансная частота 13078 МГц, соответствующая сильному поглощению энергии СВЧ-волны; 2. – резонансная частота 12901 МГц, соответствующая слабому поглощению энергии СВЧ-волны (на ней распределение полей не изучали)

Размеры резонатора указаны в прил.1. Профили электрического и магнитного полей были зафиксированы при помощи метода пробного тела. Измерения для электрического поля были проведены кусочком диэлектрика ($V = 1,96 \cdot 2,88 \cdot 2,34 \text{ мм}^3$) с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 16$ в качестве пробного тела; для магнитного поля – оловянным шариком ($2r = 2,03 \pm 0,01 \text{ мм}$).

Описание экспериментальной установки

Схема экспериментальной установки представлена на рис.2.

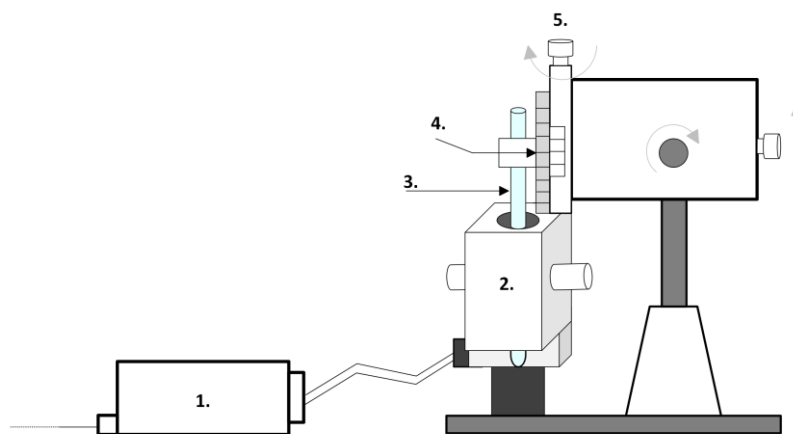


Рис. 3. Экспериментальная установка: 1 – векторный рефлектометр САВАН-R140; 2 – резонатор; 3 – стеклянная трубка с пробным телом; 4 – шкала уровня; 5 – регулятор уровня.

Стеклянная трубка с закрепленным пробным телом размещалась на оси резонатора таким образом, чтобы в момент начала эксперимента ее пустой конец полностью находился в объеме резонатора. Это необходимо для исключения краевых эффектов и изменения структуры электромагнитного поля при перемещении края трубки. Трубка постепенно вдвигалась в объем резонатора с шагом в $1 \pm 0,2$ мм. Рефлектометром САВАН в каждом положении пробного тела определяли отношение амплитуд падающих и отраженных в резонаторе волн частотного диапазона от 8 до 14 ГГц.

Результаты теоретической части

При помощи моделирования в программе CST-2018 SE были определены резонансные частоты прямоугольного резонатора (Рис.4), и на тех, что входят в рабочий диапазон 8-14 ГГц рефлектометра САВАН, получены изображения мод колебаний.

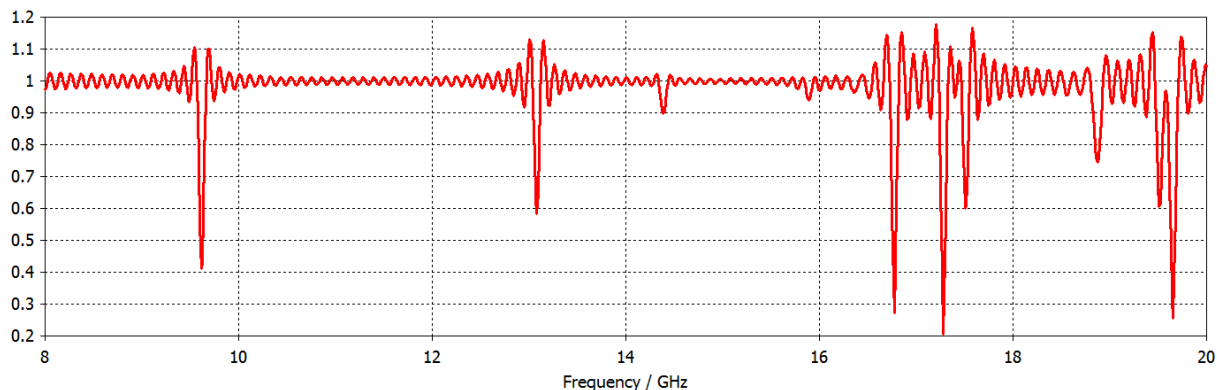


Рис. 4. График зависимости отношения амплитуд падающих и отраженных в резонаторе волн от частоты СВЧ-излучения (1 – полное отражение, 0 – полное поглощение).

Так резонансной частоте 9,782 ГГц соответствует мода колебаний TE_{102} , распределение магнитного и электрического поля которой изображены на Рис. 5. Мы наблюдаем слабую асимметрию распределения полей в резонаторе, вызванную дифракцией волн на отверстиях в стенках и различием и особенностями расчетной модели - сверху и снизу от объема резонатора предполагается идеально проводящая среда, тогда как вне левого и верхнего отверстия находится непроводящая среда, предотвращающая распространение волн.

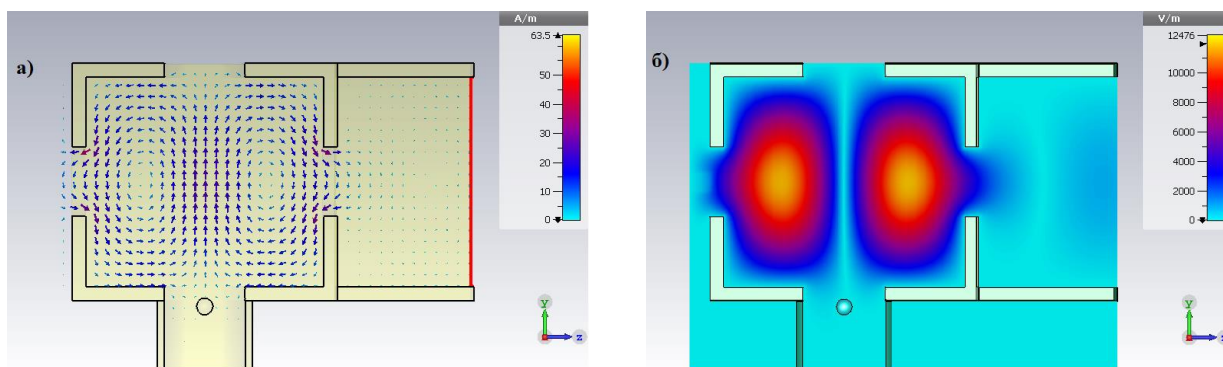


Рис. 5. Распределение на резонансной частоте 9,782 ГГц (мода TE_{102}): а) – магнитной составляющей поля; б) электрической составляющей поля.

Резонансной частоте 13,406 ГГц соответствует мода колебаний TE_{203}^* , если смотреть по оси OZ. Дело в том, что из-за особенностей строения резонатора электромагнитное поле на этой частоте образует в середине объема фигуру, внешне напоминающую песочные часы, с ориентацией по оси OY.

Вследствие этого мода не поддаётся классической классификации TE_{203} : если смотреть на распределение по оси OY , то её достовернее будет обозначить как TE_{201} . Условно оставим за представленной модой колебаний название TE_{203} *. Для этой частоты распределение магнитного и электрического поля представлены на Рис.6.

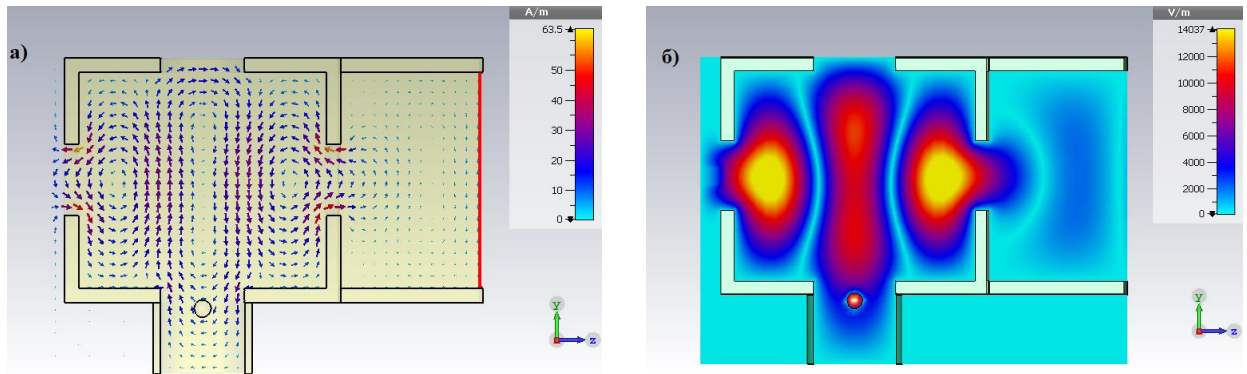


Рис. 6. Распределение на резонансной частоте 13,406 ГГц (мода TE_{203} *): а) – магнитной составляющей поля; б) электрической составляющей поля.

В результате моделирования в программе CST-2018 SE методом пробного тела проход диэлектрического тела (пластинки) объема резонатора по оси OZ и оловянного шарика по оси OY , были вычислены идеализированные теоретические профили электрического и магнитного поля (Рис.7). Начало координат соответствует середине объема резонатора.

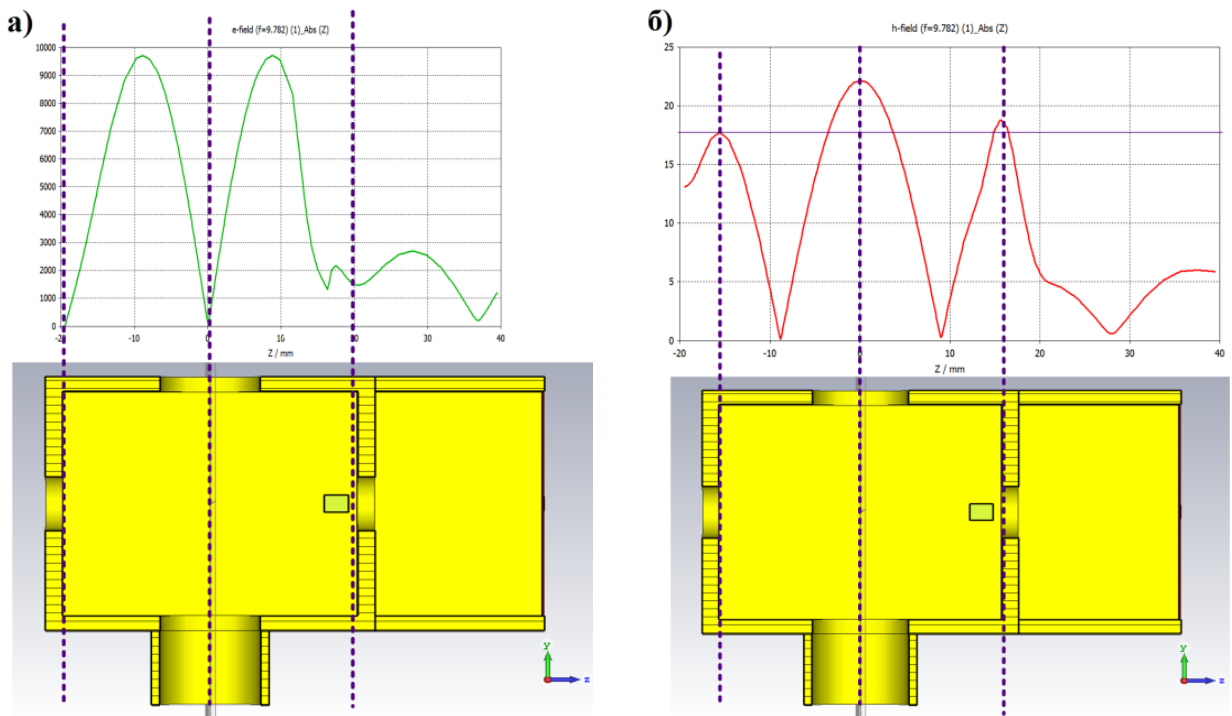


Рис. 7. Теоретические профили для электрического (а) и магнитного(б) поля на частоте 9,782 ГГц, масштаб по горизонтальной оси (OZ) одинаковый, пунктирными линиями показаны «границы» резонатора, по вертикали шкалы в «условных единицах».

Результаты вычислений имеют очень приблизительный характер вследствие малой производительности ЭВМ (для более точных расчетов понадобилось бы уменьшить размер сетки и, соответственно, количества ячеек) для решения уравнений, но технически это за пределами возможностей доступных ПК. (Время расчета одной зависимости при максимальной загрузке памяти ПК было более 10 часов). Однако качественно результаты расчетов не противоречат экспериментальным данным. В данном разделе приведены графики теоретического профиля электромагнитного поля на резонансной частоте 9,782 ГГц. Графики изменения резонансных частот для частоты 13,406 ГГц можно найти в прил.2. Из вычислений в CST-2018 SE следует, что собственная добротность идеализированного резонатора равна $Q_0=12*10^3$.

Результаты экспериментальной части

Имея с «идеальным» смоделированным в программе резонатором одинаковые размеры, реальный резонатор отличается от него значениями резонансных частот. Метод пробного тела экспериментально был проверен только на резонансной частоте 9683,5 МГц для электрического поля и 9426 МГц для магнитного. Дело в том, что для исследования электрической составляющей поля в резонаторе был использован адаптированный метод пробного тела (прямоугольный кусочек диэлектрика в стеклянной трубке), тогда как для магнитной составляющей был опробован полноценный метод пробного тела с оловянным шариком на нитке, потребовавший, однако, дополнительного включения в объём резонатора двойной стеклянной трубки. Трубка предотвратила появление нежелательных механических колебаний тела на нитке, но, имея диэлектрическую проницаемость $\epsilon=6$ и большой объём, вызвала уменьшение частоты, на которой исследовалось распределение магнитного поля, на 200 МГц. Этот факт наблюдается при сравнении графиков, представленных на Рис.8. Для их построения с учётом $\nu-\nu_0 \ll \nu_0$ была использована формула (1), т.е. для качественного описания полей использовались соотношения:

$$B \sim \sqrt{\nu - \nu_0};$$

$$E \sim \sqrt{\nu - \nu_0};$$

где ν_0 – невозмущённая резонансная частота, ν – смещённая (возмущённая) резонансная частота.

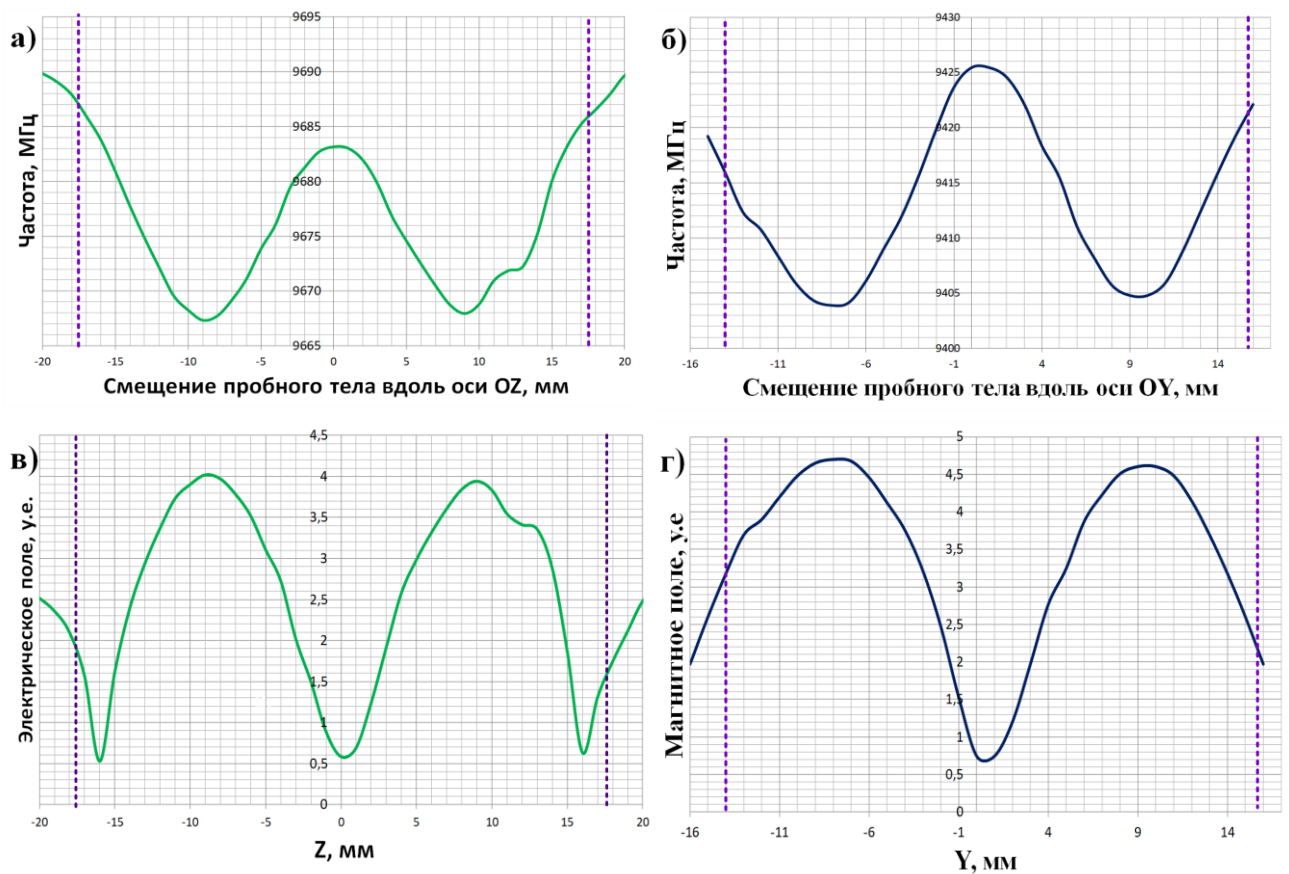


Рис. 8. Графики изменения резонансной частоты от положения пробного тела для электрического (а) и магнитного(б) поля при опорных частотах 9683,5 МГц и 9426 МГц соответственно; экспериментальные профили электрического (в) и магнитного(г) поля на частотах 9683,5 МГц и 9426 МГц соответственно; пунктирными линиями обозначены «границы» резонатора.

Экспериментально добротность прямоугольного резонатора не удалось вычислить из-за его сложной формы и невозможности перемещения пробного тела при наличии регулируемого элемента связи. Однако по низкой связи и большим потерям энергии можно судить, что собственная добротность исследуемого резонатора составляет примерно $5-6 \cdot 10^3$ (половина значения добротности смоделированной идеализированной версии резонатора).

Выводы

Сравнивая графики распределений полей на Рис.7 и Рис.8 (б, в) можно прийти к выводу, что качественно они соответствуют друг другу, полностью отражая характер распределения поля внутри резонатора. Однако возможно заметить несовпадение в значениях частот и ширины резонансных областей. Это связано с рядом причин:

- 1) Малая производительность ПК для моделирования протекания физических процессов;
- 2) Для ускорения теоретических подсчётов пришлось уменьшить количество клеток и, соответственно, увеличить их размер в сетке модели, что сильно сказалось на точности вычислений;
- 3) Хотя и размеры, и характеристики реального резонатора были максимально близко повторены в программе CST-2018 SE, они всё же являются грубым приближением к действительности;
- 4) Материалы, используемые в модели, идеализированы, значит, не повторяют всех свойств и дефектов реальных веществ, не учитывают на них потери энергии;
- 5) При проведении эксперимента методом пробного тела были использованы стеклянные трубки с шариком (или кусочком диэлектрика) внутри, которые перемещались по объёму резонатора. Их наличие указывает на то, что метод был проведен неполноценно, но действительно, был адаптирован под возможные условия проведения эксперимента. Стекло внесло большой вклад в возникновение краевого эффекта и искривлений полей, в уменьшение реальных исследуемых резонансных частот электромагнитного поля. Однако не было возможности учесть этот источник погрешностей при теоретических вычислениях.

Таким образом, было произведено изучение и измерение распределения электромагнитного поля в прямоугольном СВЧ резонаторе. Сравнение экспериментально полученных данных с теоретическими вычислениями для прямоугольного СВЧ резонатора проведено. Было показано, что для подобных целей метод пробного тела применим и в достаточной мере точен.

Библиографический список

1. Ч. Пул. Техника ЭПР-спектроскопии. Мир, 1970.
2. Slater, J. C. (1946). Microwave Electronics. *Reviews of Modern Physics*, 18(4), 441–512.
3. Jack H. Freed, Daniel S. Leniart, and James S. Hyde. Theory of Saturation and Double Resonance Effects in ESR Spectra. III. rf Coherence and Line Shapes, **47**, 2762 (1967), *American Institute of Physics*

Приложение

1.

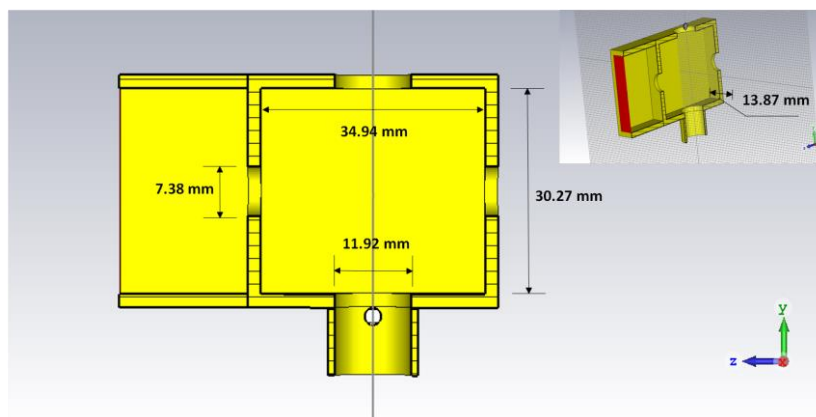


Рис.1. Размеры прямоугольного резонатора

2.

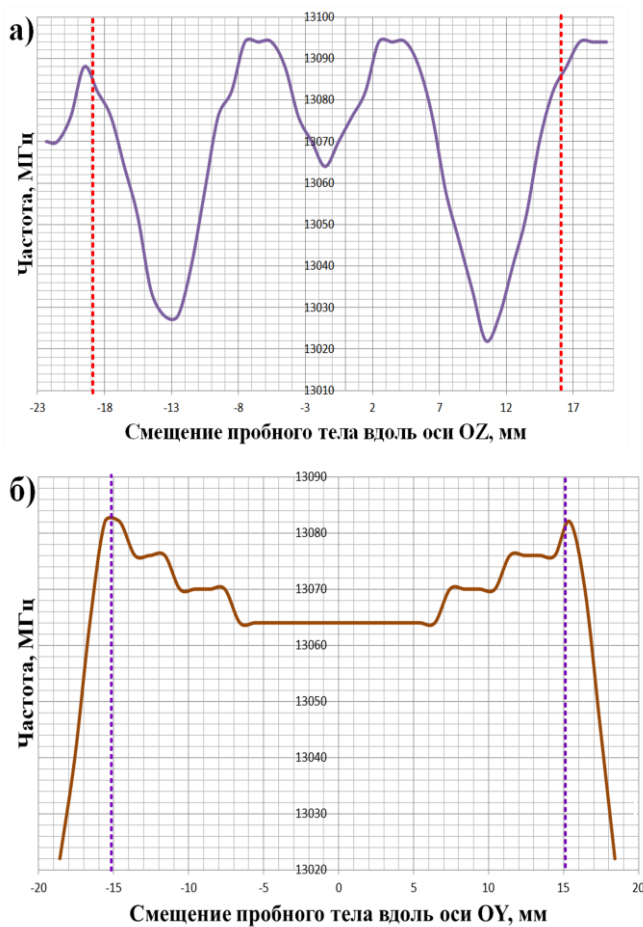


Рис. 2. Теоретические графики изменения частоты для электрического (а) и магнитного (б) поля при опорной частоте 13,064 ГГц; пунктирными линиями обозначены «границы» резонатора.