

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В.ЛОМОНОСОВА»

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА АТОМНОЙ ФИЗИКИ, ФИЗИКИ ПЛАЗМЫ И  
МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

Курсовая работа

«Плоский СВЧ зонд измерения плотности плазмы над поверхностью  
электрода»

Выполнил студент  
206 группы  
Ивкин Николай Владимирович

Научный руководитель:  
к.ф.-м.н. Богданова Мария Андреевна

МОСКВА  
2024

# Оглавление

1. Введение	4
1.1. Общие сведения . . . . .	4
1.2. Актуальность работы . . . . .	5
1.3. Цель работы и новизна . . . . .	5
2. Теория	6
2.1. Плазма . . . . .	6
2.1.1. Определение . . . . .	6
2.1.2. Ёмкостной ВЧ-разряд . . . . .	7
2.1.3. Плазменный слой . . . . .	7
2.2. Диагностика плазмы . . . . .	8
2.2.1. Существующие методы диагностики . . . . .	8
2.2.2. СВЧ-зонд . . . . .	8
2.2.3. Известные проблемы . . . . .	11
2.3. СВЧ-антенна . . . . .	11
2.3.1. СВЧ-излучение . . . . .	11
2.3.2. СВЧ-излучатель . . . . .	11
3. Эксперимент	13
3.1. Выбор формы СВЧ-антенны . . . . .	13
3.2. Идея эксперимента . . . . .	14
3.3. Моделирование . . . . .	14
3.3.1. Средство моделирования - COMSOL multiphysics . . . . .	14
3.3.2. Приближение просчёта физики в модели . . . . .	14
3.3.3. Задание начальных параметров модели . . . . .	15
3.3.4. Создание модели антенны: GPS-антенна . . . . .	18
3.3.5. Создание модели антенны: Полнотелая спираль . . . . .	20
3.4. Анализ результатов . . . . .	21
3.4.1. Резонансные графики . . . . .	25
3.4.2. Поля в дальней зоне . . . . .	25
3.4.3. Направленность поля . . . . .	25
3.5. Выводы . . . . .	26

4. Подведение итогов проделанной работы	27
4.1. Итоги и перспективы . . . . .	27

# 1. Введение

## 1.1. Общие сведения

Одним из ключевых трендов развития современной микроэлектроники заключается в постепенном уменьшении размеров микросхем при одновременном уплотнении электронных компонентов на нём.

Кроме того, с развитием технологии производства чипов с топологическим размером  $< 20$  нм становятся жёстче и требования к точности контроля технологического процесса.

Технология создания чипов включает в себя ряд ступеней, во многих из которых применяются такие методы обработки материалов, как травление, осаждение, функционализация, очистка.

Низкотемпературная высокочастотная плазма низкого давления лежит в основе многих технологий, широко используемых в производстве современных микросхем. Плазма является альтернативой оптимальной альтернативой изжившим себя методам жидкостного травления.

Плазменное травление относится к так называемым сухим методикам нанесения тонких пленок на подложку и размерного травления пленок с заданными параметрами. Плазма позволяет обеспечить высокое качества обработки с точностью до атомарного уровня.

Вместе с тем от состава плазмы и её свойств напрямую зависит качество получаемых деталей и процент брака.

В текущих условиях диагностика плазмы играет ключевую роль в технологии производства микросхем.

Данная работа изучает один из методов контроля- плоский СВЧ-зонд.

## 1.2. Актуальность работы

Основная проблема диагностики плазмы заключается в принципиальной трудности осуществления контроля параметров плазмы в реальных условиях производства.

Должны использоваться методы, позволяющие производить диагностику плазмы в промышленном реакторе, не влияя на процесс травления.

## 1.3. Цель работы и новизна

Целью работы является создание нового метода диагностики плазмы с использованием плоского СВЧ-зонда непосредственно вблизи поверхности подложки, то есть электрода ВЧ-реактора.

Такой метод будет являться принципиально новым, так как в научной литературе присутствует мало работ, в которых предложена только его идея.

## 2. Теория

### 2.1. Плазма

#### 2.1.1. Определение

Плазма – квазинейтральная среда, обладающая характерными свойствами и состоящая из несвязанных нейтральных и заряженных частиц.

Обычно плазма характеризуется концентрацией электронов и ионов  $n_e$  и  $n_i$  и их температурами  $T_e$  и  $T_i$  соответственно, степенью ионизации, зарядом иона. Высокая подвижность частиц плазмы обеспечивает экранирование внесённого в плазму заряда на расстояние порядка радиуса Дебая (пространственный масштаб) за времена порядка обратной плазменной частоты  $\omega_p$  (временной масштаб).

Радиус Дебая - расстояние экранирования внесённого заряда или внешнего поля в плазме. Явление экранирования наблюдается за счёт значительно большей подвижности электронов относительно ионов.

$$r_{de} = \sqrt{\frac{kT_e}{8\pi n_e e^2}} \quad (2.1)$$

Пространственный и временной масштабы обычно малы, поэтому концентрации положительных и отрицательных зарядов оказываются практически одинаковыми, в этом смысле говорят о квазинейтральности плазмы. Это важнейшее свойство часто используют для её определения, следуя И. Ленгмюру, впервые применившему в 1920-х гг. термин «плазма» для обозначения удалённой от электродов квазинейтральной области газового разряда.

### 2.1.2. Ёмкостной ВЧ-разряд

Основной особенностью емкостного разряда является образование, так называемых приэлектродных слоев.

Даже при весьма низкой плотности электронов и характерной для разрядной плазмы электронной температуре дебаевский радиус много меньше типичных межэлектродных расстояний, поэтому в серединной части промежутка плазма электронейтральна. Однако вблизи электродов электронный газ, совершая колебания относительно малоподвижных ионов, периодически то «заливает», то обнажает положительные заряды. Это является первопричиной появления вблизи границ приэлектродных слоев положительного пространственного заряда.

Приэлектродными будем называть слои и в том случае, когда металлические электроды изолированы от разрядной плазмы диэлектриками.

### 2.1.3. Плазменный слой

Плазменный слой (оболочка Дебая) - это слой в плазме, который имеет большую плотность положительных ионов и, следовательно, общий избыточный положительный заряд, который уравнивает противоположный отрицательный заряд на поверхности материала, с которым он контактирует. Толщина такого слоя составляет несколько длин Дебая.

Оболочка Дебая возникает в плазме, потому что электроны обычно имеют температуру на порядок или больше, чем у ионов, и намного легче. Следовательно, на границе раздела с поверхностью материала электроны будут вылетать из плазмы, заряжая поверхность отрицательно по отношению к объему плазмы. Из-за дебаевского экранирования длина переходной области будет равна длине Дебая  $r_{de}$ .

По мере увеличения потенциала все больше и больше электронов отражается потенциалом оболочки. Равновесие,

наконец, достигается, когда разность потенциалов в несколько раз превышает температуру электронов. Оболочка Дебая - также переходной слой от плазмы к твердой поверхности.

Аналогичная физика задействована между двумя областями плазмы, которые имеют разные параметры. Переход между этими областями известен как двойной слой и имеет один положительный и один отрицательный слой.

## 2.2. Диагностика плазмы

### 2.2.1. Существующие методы диагностики

Для измерения параметров плазмы в экспериментах применяются различные диагностические средства, позволяющие прямо или косвенно определить концентрации частиц заряженных и нейтральных частиц плазмы.

Исторически первыми методами диагностики плазмы были зондовые методы с использованием зондов Ленгмюра различных модификаций.

Весьма популярны оптические диагностики (включая рентгеновскую), использующие как собственное излучение плазмы, так и просвечивающие методы: лазерную и СВЧ-интерферометрию и дифрактометрию, методы, основанные на рассеянии света (томсоновском и коллективном), метод фазового контраста и др.

Основные проблемы диагностики плазмы состоят именно в трудностях нахождения локальных значений параметров плазмы и во множественности факторов, от которых зависят результаты измерений.

### 2.2.2. СВЧ-зонд

Плазма имеет ряд собственных мод колебаний, наиболее фундаментальной из которых является частота электронов в плазме  $\omega_{pe}$ . Также есть собственные частоты ионов -  $\omega_{pi}$ ,



однако, в то время как частота осцилляций электронов из-за их малой массы находится в диапазоне ГГц, частоты ионов находятся в диапазоне МГц. Поэтому можно с высокой точностью считать, что частота плазмы равна  $\omega_{pe}$ . Аналитическое выражение для частоты электронов в плазме:

$$\omega_{pe}^2 = \frac{e^2 n_e}{\varepsilon_0 m_e} \quad (2.2)$$

где  $e$  - заряд электрона,  $n_e$  - концентрация электронов,  $\varepsilon_0$  - диэлектрическая проницаемость вакуума,  $m_e$  - масса электрона.

Для измерения плотности электронов в данной работе применяется резонансный СВЧ зонд. Его принцип работы основан на измерении диэлектрической проницаемости холодной плазмы, зависимость которой от частоты приложенного поля имеет вид:

$$\varepsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2} \quad (2.3)$$

Резонансный СВЧ зонд представляет из себя вставленную в плазму структуру из двух параллельных проводов, конец одного из которых закорочен, а другого открыт.

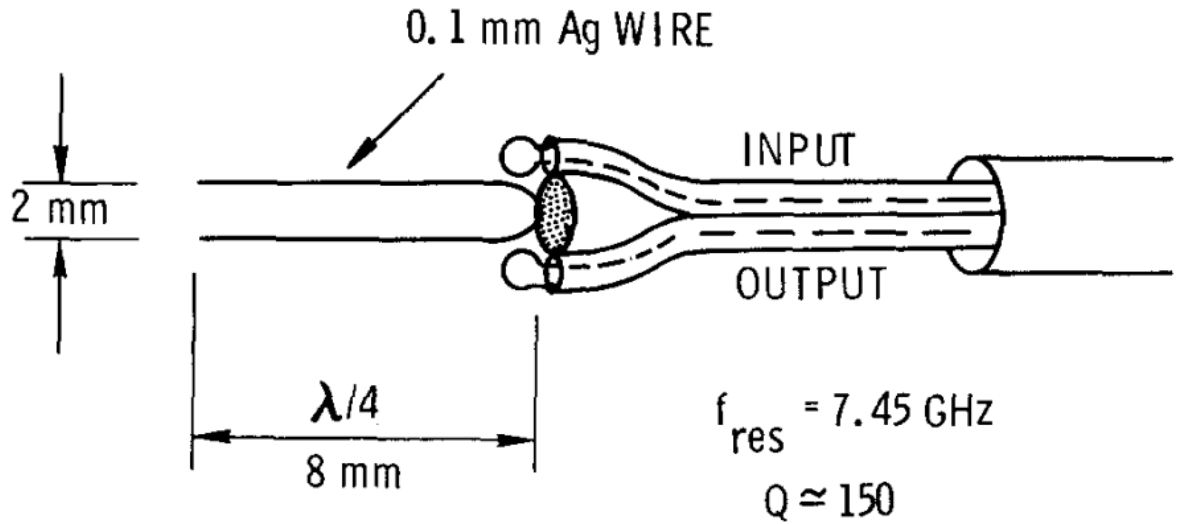


Рисунок 2.1: Пример инвазивного СВЧ-зонда

Для такой конструкции резонансная частота выражается следующей формулой:

$$\omega_{res} = \frac{\pi}{2} \frac{c}{\sqrt{\epsilon}} \quad (2.4)$$

где  $\epsilon$  - диэлектрическая проницаемость плазмы. Таким образом получается, что сдвиг резонансной частоты зависит от частоты плазмы  $\omega_{pe}$ , а, следовательно, от концентрации электронов следующим образом:

$$\omega_{res}^2 = \omega_{res0}^2 + \omega_{pe}^2 \quad (2.5)$$

В слабозамагниченной плазме сдвиг резонансной частоты не зависит от магнитного поля и, следовательно, не зависит от ориентации резонатора относительно  $\vec{B}$ -поля. Если выбрать расстояние между проводами большее по сравнению с толщиной оболочки, то влияние оболочки на резонансную частоту становится ничтожным. Следовательно, измерение плотности практически не зависит от электронной температуры и флуктуации потенциала плазмы.

### 2.2.3. Известные проблемы

Описанный метод полезен для измерения плотности плазмы в объёме, однако не показывает реальной картины в поверхностном слое у образца и является инвазивным, то есть требует внесения резонансной структуры в область газового разряда. Это сильно усложняет конструкцию и нарушает герметичность плазменного реактора. Также в процессе работы зонд подвергается плазменному травлению. Существует идея реализации зонда -плоского СВЧ-зонда, встраиваемого в электрод, позволяющий исследовать плазму, в области у поверхности, не внося резонансную структуру в область газового разряда.

### 2.3. СВЧ-антенна

#### 2.3.1. СВЧ-излучение

Микроволновое излучение — область спектра электромагнитного излучения с длинами волн от 1 м до 1 мм, соответствующими частотам от 300 МГц и до 300 ГГц соответственно. Вышеупомянутое широкое определение включает диапазоны: УВЧ (дециметровые волны), СВЧ (сантиметровые волны) и КВЧ (миллиметровые волны). Более распространённое определение в радиотехнике — диапазон от 1 до 100 ГГц.

#### 2.3.2. СВЧ-излучатель

Основной характеристикой такой антенны является направленность действия, определяющая неодинаковость излучения антенн в различных направлениях. При рассмотрении направленности действия необходимо учитывать поляризационную характеристику антенны, которая определяет поляризацию излучаемых и принимаемых

ею волн.

Антенна может излучать поле с вертикальной, горизонтальной, круговой или эллиптической (вращающейся) поляризацией, причем в зависимости от направления вращения поля волны могут быть как право -, так и левонаправленными. Для сравнения направленности действия различных антенн и расчета их характеристик вводят ряд параметров.

Не менее важными являются энергетические характеристики, определяющие значения и изменения в процессе работы ряда величин, характеризующих: максимально допустимую мощность излучения, при которой достигается граница электрической прочности и допустимого теплового режима, мощность в антенно-фидерном тракте, мощность шумов, развиваемая на входе приемника; мощность, требуемая для управления положением луча в пространстве, и т.д.

Величины этих мощностей характеризуются КПД, шумовой температурой, входным сопротивлением антенны, волновым сопротивлением фидера, согласованием в питающем фидере и другими параметрами.

### 3. Эксперимент

#### 3.1. Выбор формы СВЧ-антенны

В работе [3] было проведено сравнительное исследование трёх антенн. Исследовались такие формы, как: ВСР (bar cutoff probe), РСР (point cutoff probe) и РСР (round cutoff probe).

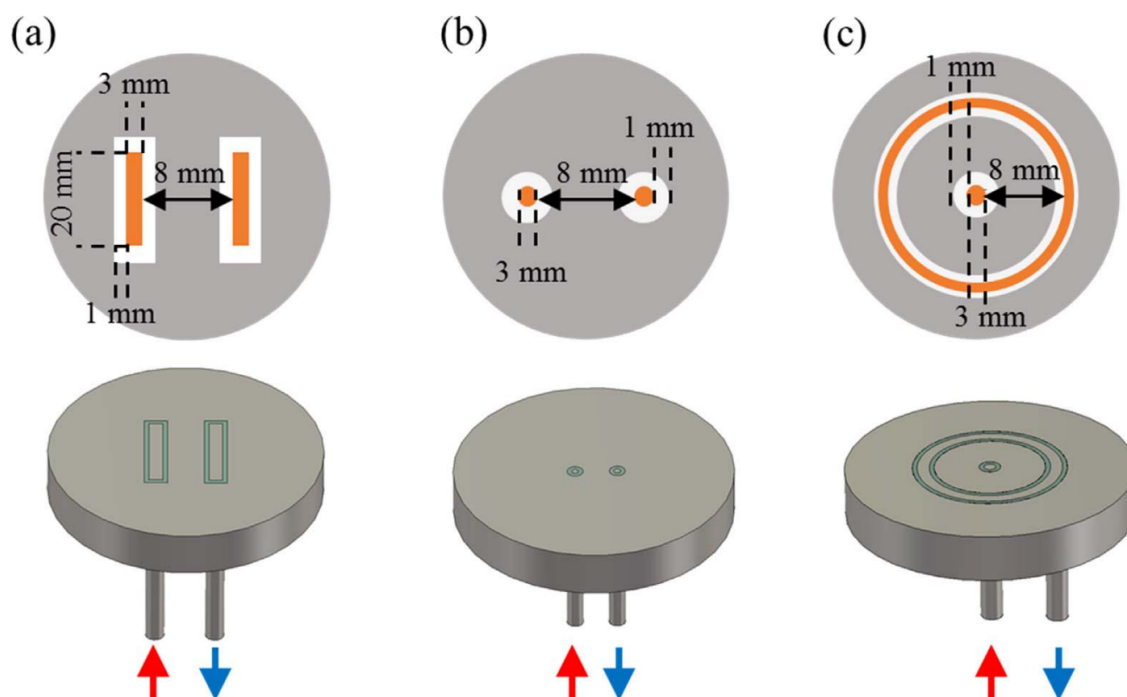


Рисунок 3.1: Три формы антенны: (a) - ВСР, (b) - РСР, (c) - РСР

Было произведено компьютерное моделирование и тестирование этих антенн в плазменном реакторе. Результатом был вывод о потенциальной пригодности использования одной из - ВСР.

В данной работе продолжается исследование антенн, но так как это первая работа по данной теме, начнём с выбора простых форм.

Было выбрано две антенны: спиральная и GPS. Выбор GPS-антенн позволит сравнить результаты, полученные из моделирования с реальными параметрами.

## 3.2. Идея эксперимента

Валидация модели GPS-антенны с последующим её использованием для построения начальной модели спиральной антенны.

## 3.3. Моделирование

### 3.3.1. Средство моделирования - COMSOL multiphysics

COMSOL Multiphysics — это пакет программного обеспечения для анализа конечных элементов, решателей и моделирования для различных физических и инженерных задач, особенно связанных явлений и мультифизики. Построение модели и исследование основанных на физике, и связанных систем уравнений в частных производных (PDE). COMSOL предоставляет интегрированную среду разработки и унифицированный рабочий процесс для электрических, механических, жидкостных, акустических и химических приложений.

Это программное обеспечение позволит быстро оценить базовые параметры системы: резонансные пики в воздухе, потери мощности, направленность поля, поле в дальнем поле, и аксиально распределение поля.

### 3.3.2. Приближение расчёта физики в модели

На данном этапе необходимо задать способ изучения антенны. В данном случае был выбран *Electromagnetic Waves, Frequency Domain*. Это позволит провести изучение собственных частот, в частотной области, модовый анализ (только 2D и осесимметричные 2D модели. Расчёт был произведён в приближении, предоставляемым алгоритмом *Wave Equation*:

$$\nabla \times \mu_r^{-1}(\nabla \times \vec{E}) - k_0^2(\epsilon_r - \frac{j\sigma}{\omega\epsilon_0})\vec{E} = 0 \quad (3.1)$$

Моделирование поле в дальней зоне происходит по алгоритму *Far – Feild Domain* с учётом *PML* на внутренней границе толстостенной сферы.

Метод расчёта дальнего поля в *Far – Feild Domain*:

- Дальнее поле антенны рассчитывается из ближнего поля, используя формулировку Stratton-Chu . В 3D виде она представляет собой:

$$E_p = \frac{jk}{4\pi} r_0 \times \int [n \times E - \eta r_0 \times (n \times H)] e^{jkr \cdot r_0} dS \quad (3.2)$$

- Вектор Умова-Пойнтинга даёт поток мощности в дальней зоне:

$$r_0 \cdot S = r_0 \cdot R_c(E_p \times H_p^*) \cong |E_p|^2 \quad (3.3)$$

В этих формулах:  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  - поля на "аппертуре"  $\vec{r}_0$  - единичный вектор указывающий направление от начала координат в точку поля  $r$ . Если точки поля лежат на поверхности сферы  $S'$ ,  $\vec{r}_0$  - единичная нормаль к  $S'$ ,  $\eta$  - импеданс,  $k$  - волновое число,  $\lambda$  - длина волны,  $\vec{r}$  - радиус вектор на поверхности  $S$ .

*PML* - (*Perfectly Matched Layer*) один из методов задания граничного условия на сетке, при котором учитывается, что волна, проходящая через границу элемента моделируемой области, не отражается, а полностью поглощается. Это позволяет избежать нежелательного искажения итоговой формы поля.

### 3.3.3. Задание начальных параметров модели

Моделирование осуществляется в толстостенной сфере радиуса  $w_{line} = 10$  сантиметров с толщиной стены 1

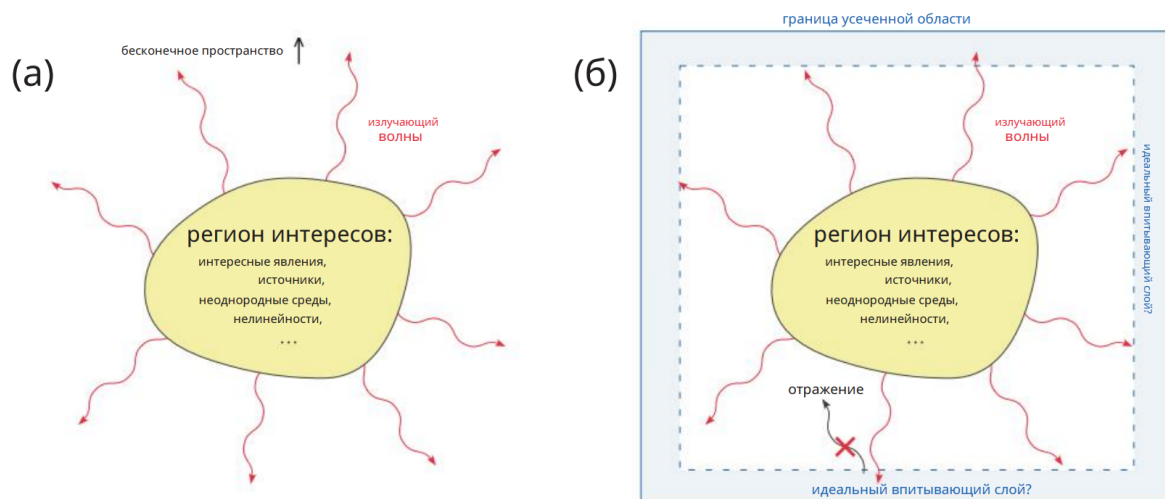


Рисунок 3.2: (а) Схема типичной задачи волнового уравнения, в которой имеется конечный регион интереса, где исследуются источники, неоднородная среда, нелинейности и т.д. из которой излучается волна на бесконечность. (б) Та же задача, но пространство было ограничено до некоторой области, в которой происходит вычисления. Поглощающий слой, расположенный по краям этой области, - идеальный поглощающий слой способен поглотить все исходящие волны без отражения от углов поглотителя

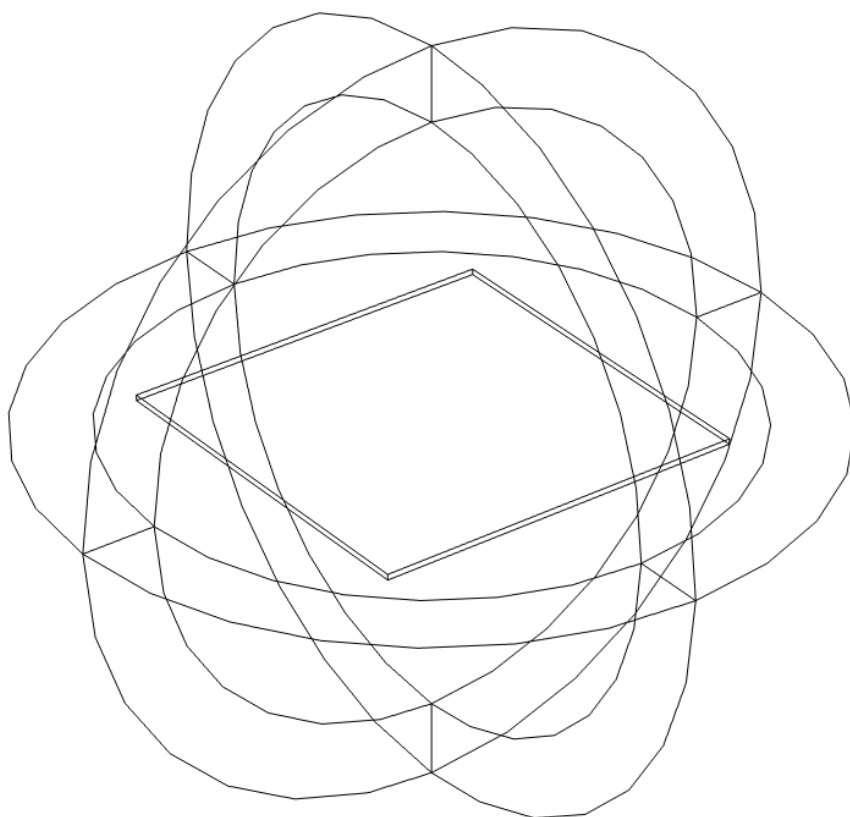


Рисунок 3.3: Сфера с текстолитом внутри

сантиметр, заполненной воздухом с диэлектрической



проницаемость  $\varepsilon = 1$ .

В этой сфере находится пластина толщиной  $d = 1.5$  миллиметра из материала с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon = 3.38$ . В данных условиях не важно, является ли этот материал идеальным диэлектриком или нет, так как целью моделирования является качественное изучение параметров формы поля антенны и вектора напряжённости.

Нижняя сторона пластины - идеальный проводник, принимаемый бесконечно тонким, по сравнению с толщиной текстолита.

Далее в текстолитовую пластину будет вставлена одна из двух геометрий антенн - GPS и спиральная

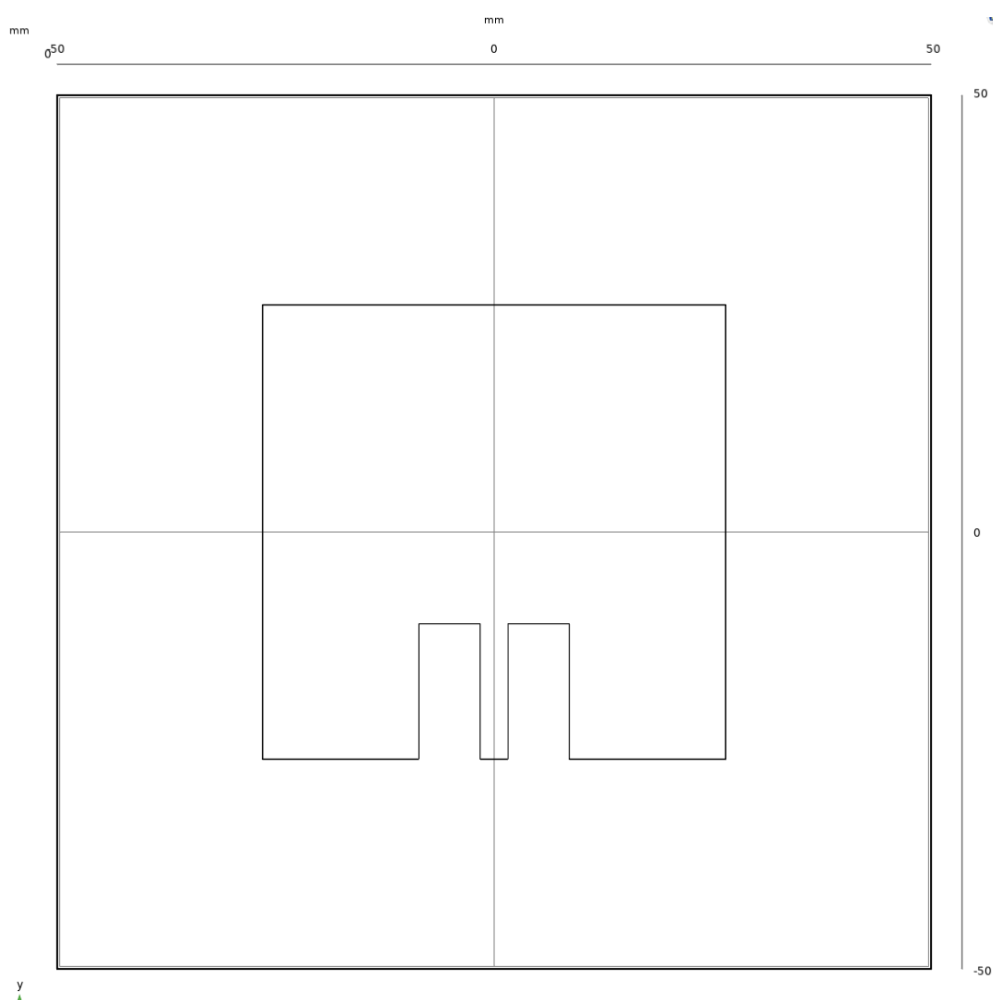
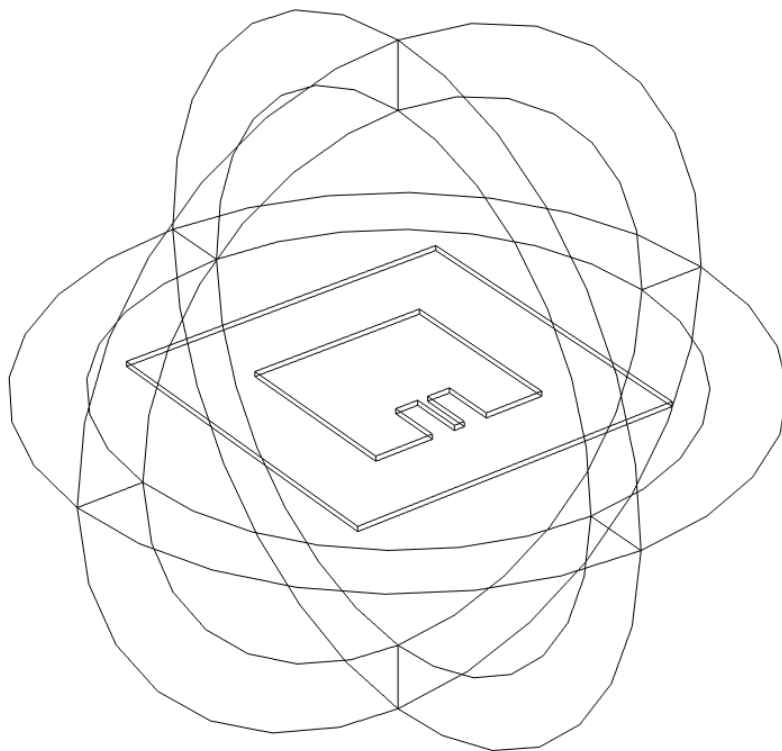


Рисунок 3.4: Геометрия GPS-антенны

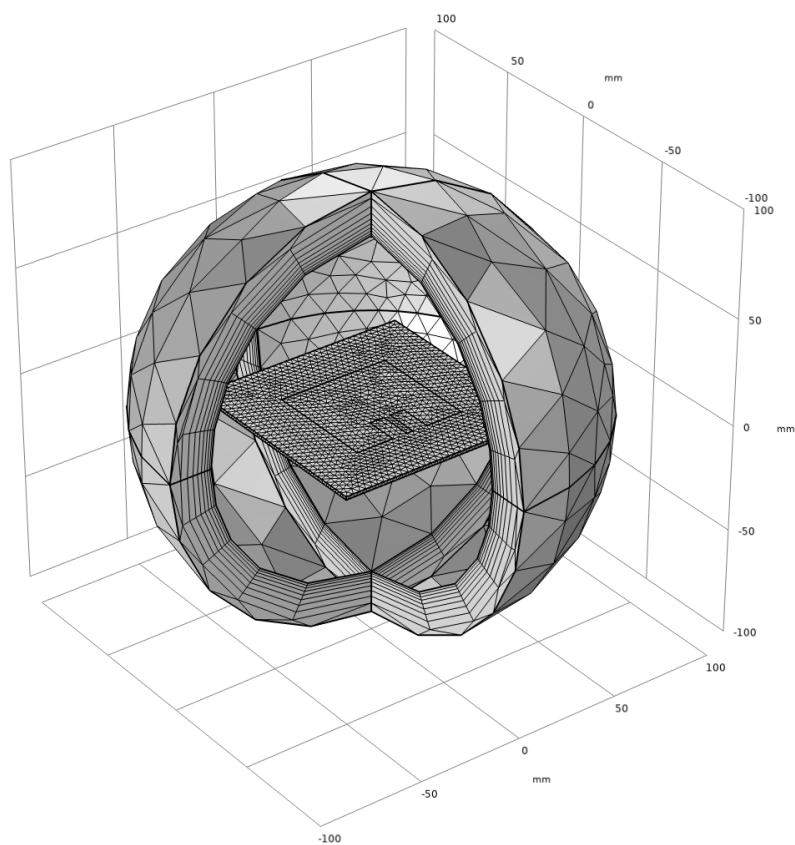
### 3.3.4. Создание модели антенны: GPS-антенна

В текстолитовую пластину вставлена медная в форме квадрата с толщиной, равной толщине текстолита и стороной  $w_{patch} = 52$  миллиметра.

С одной из сторон в медной пластине сделано два углубления. Расположены они с некоторым отступлением от середины стороны. Толщина углублений равна толщине пластины, ширина и длина - 7 и 16 миллиметров.



(a) Модель GPS антенны



(b) Сетка для моделирования физики GPS-антенны

Рисунок 3.5

### 3.3.5. Создание модели антенны: Полнотелая спираль

Так как используется те же начальные параметры, начальные условия (толщина пластины, материал и т.д.) заданы аналогично.

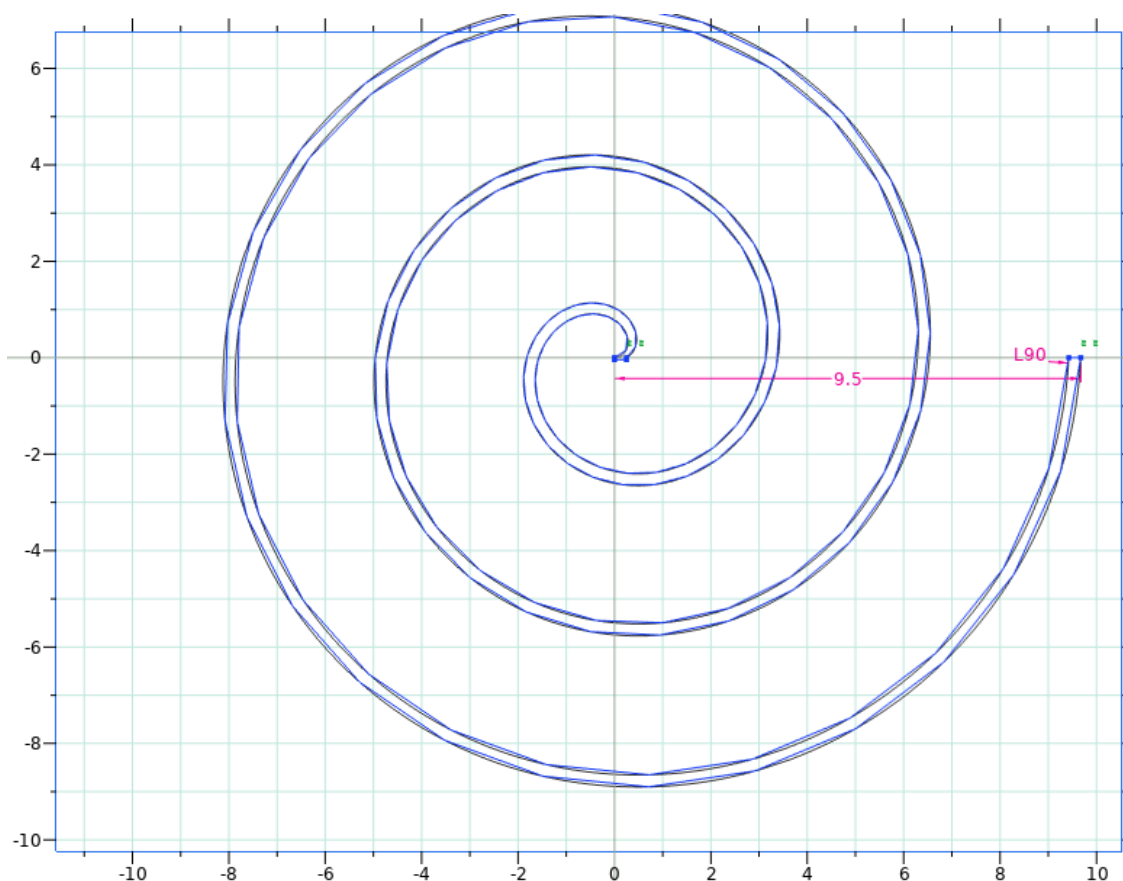


Рисунок 3.6: Полнотелая спираль

В данную пластину вставлена полнотелая спиральная антенна шириной  $d_1 = 0.4$  миллиметра, длиной  $l = 90$  миллиметров и линейным размером  $r = 9.5$  миллиметров. Она состоит из двух смещенных относительно друг друга спиралей. Каждая из них задаётся параметрически по формуле  $x = 0.5 \cdot s \cdot \cos(s)$ ;  $y = 0.5 \cdot s \cdot \sin(s)$ , где  $s \in [0, 6\pi]$ , однако одна смещена на 0.5 миллиметров относительно другой. Толщина антенны равна толщине пластины.

Материал спирали - медь.

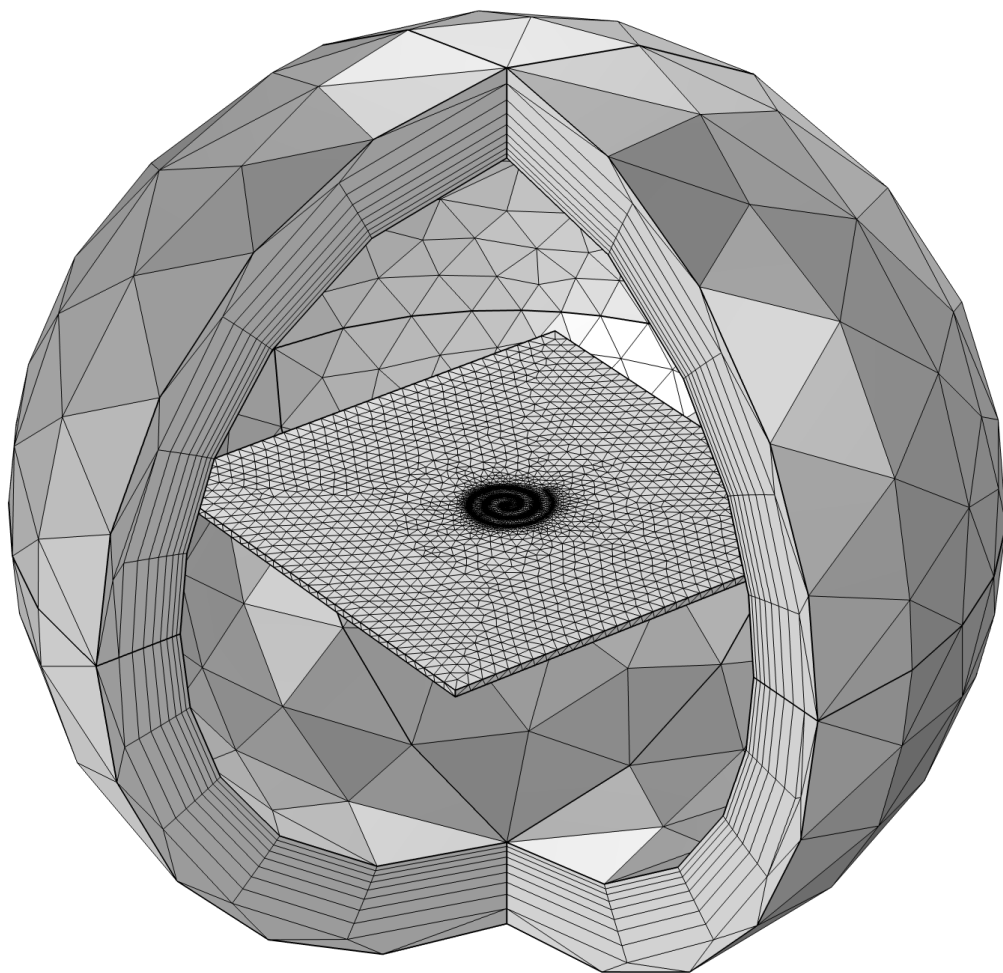
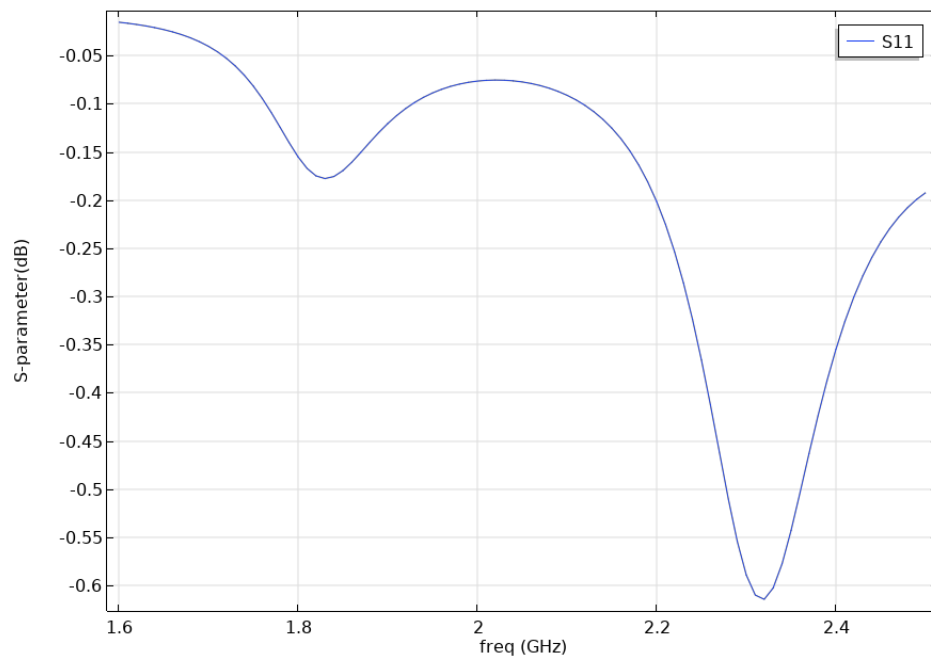


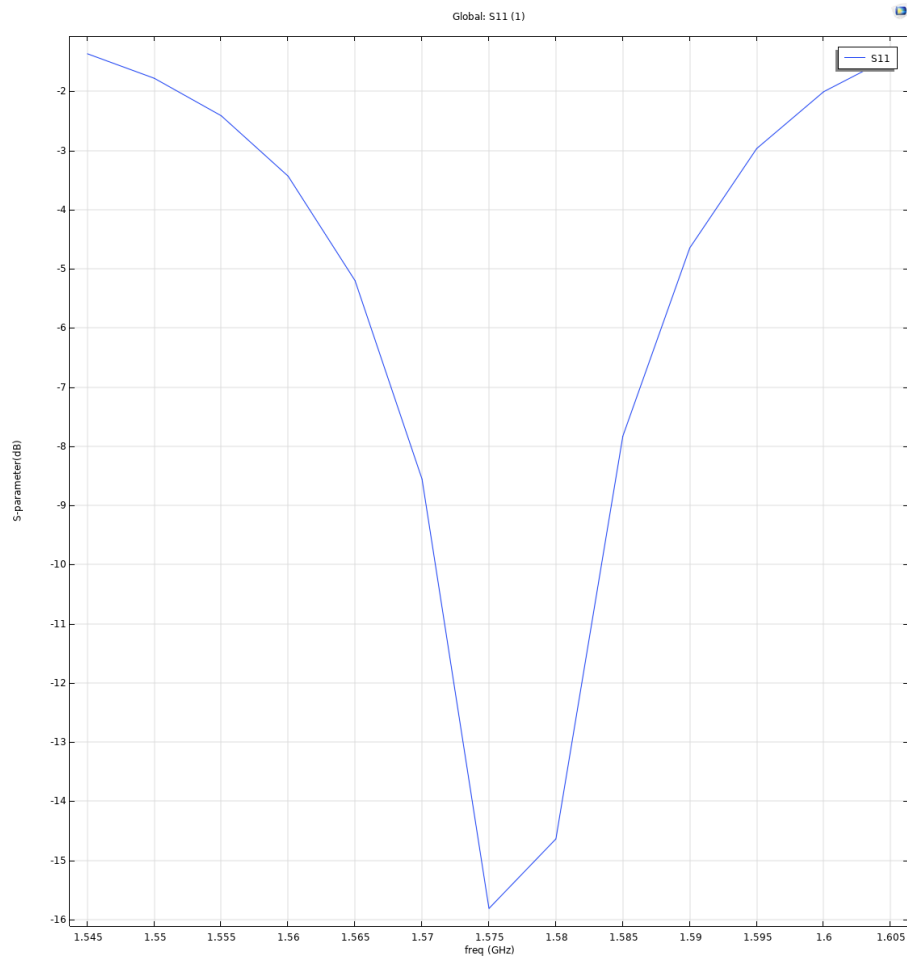
Рисунок 3.7: Итоговый вид сетки спиральной антенны

### 3.4. Анализ результатов

Проведён сравнительный анализ результатов моделирования резонансных графиков и полей антенн.

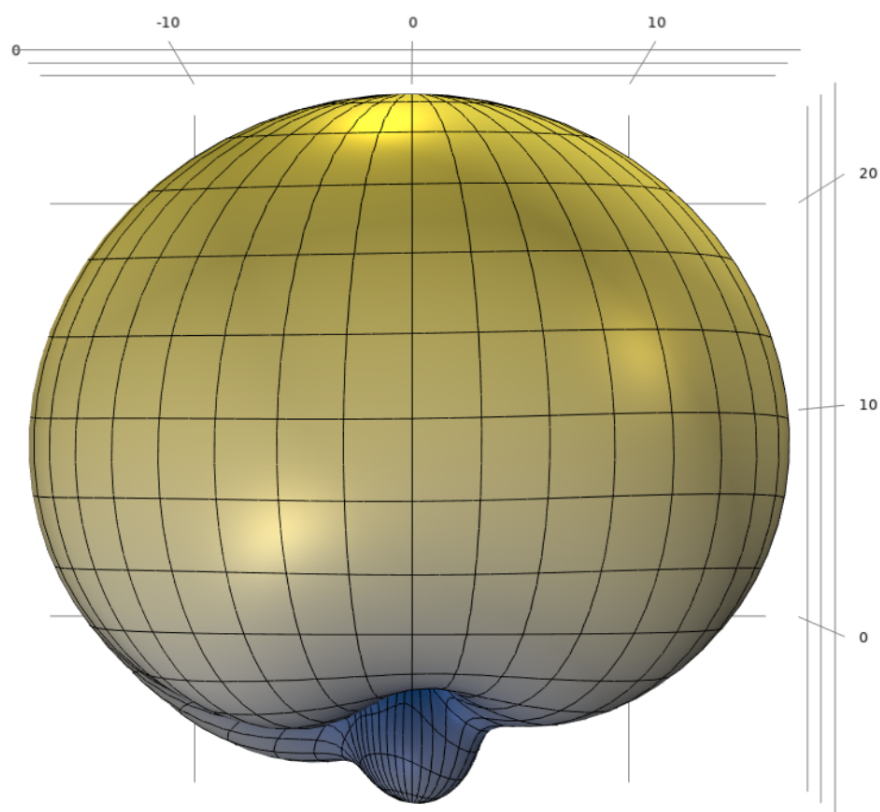


(a) Спиральная антенна

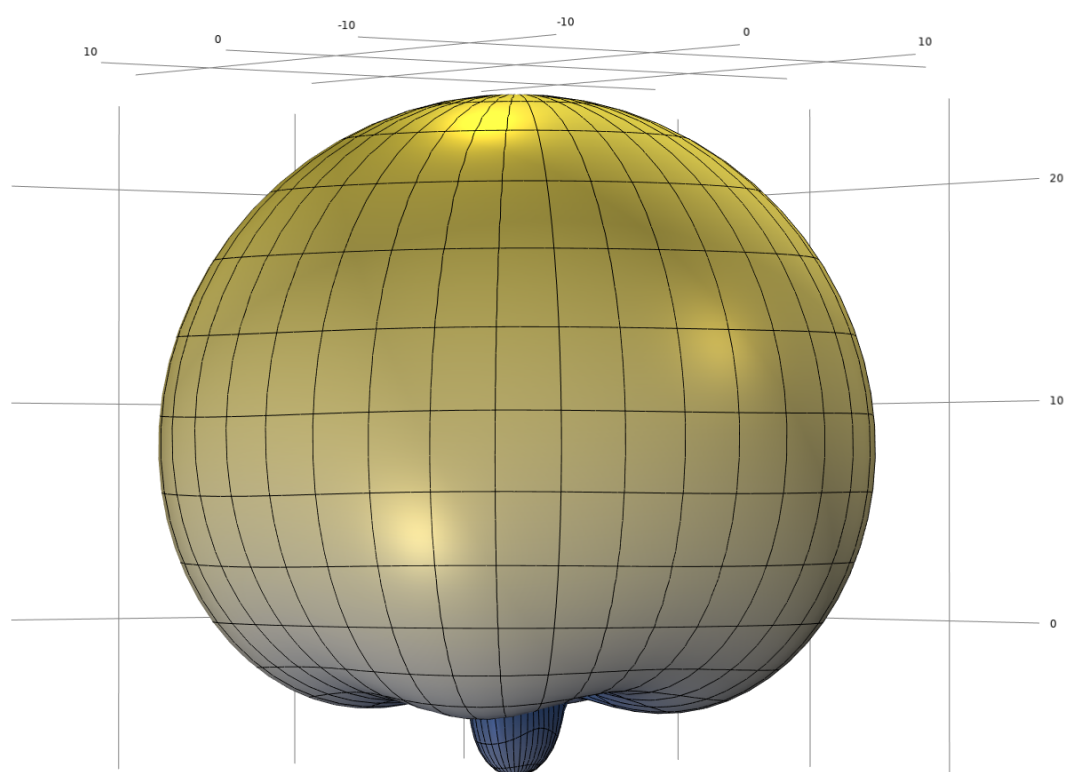


(b) GPS-антенна

Рисунок 3.8: Резонансные графики

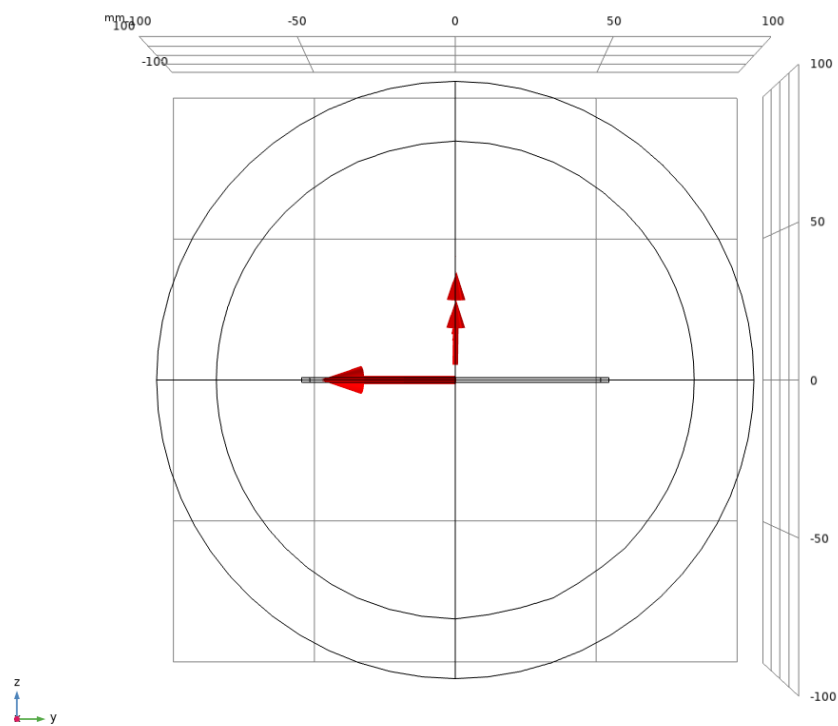


(а) Спиральная антенна

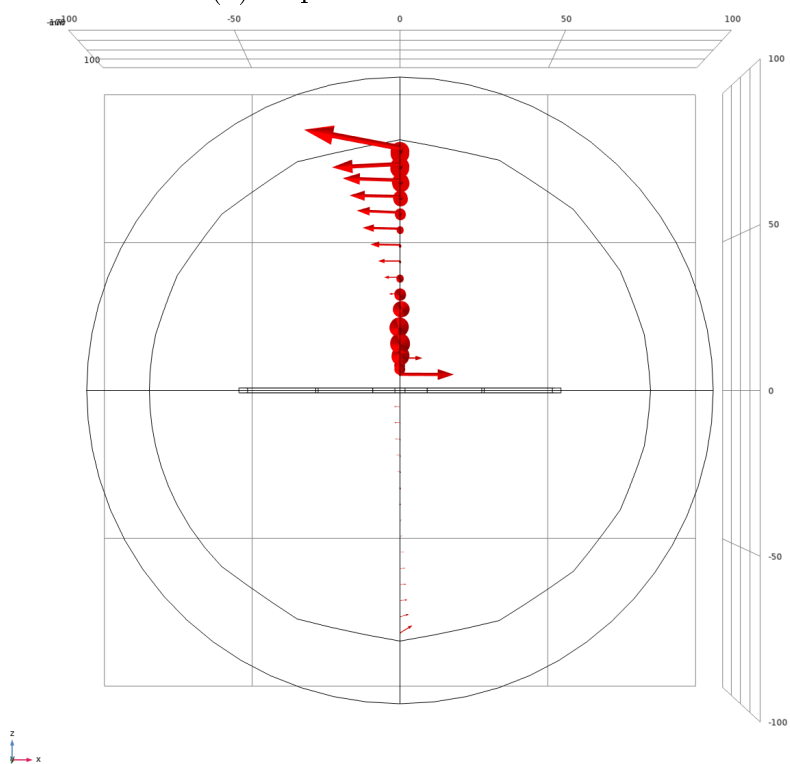


(b) GPS-антенна

Рисунок 3.9: Поле в дальней зоне



(a) Спиральная антенна.



(b) GPS-антенна.

Рисунок 3.10: Направления и величины электрического и магнитного поля. Электрическое поле обозначено двойной стрелкой, магнитное - одинарной:



### 3.4.1. Резонансные графики

Как видно из графика 3.8, спиральная антенна с данной геометрией имеет не лучшие резонансные пики. Они уширены, и наблюдаются достаточно близко. Резонанс достигается на частотах  $f = 1.83\text{Ghz}$  и  $2.32\text{Ghz}$  соответственно.

Для ускорения расчётов использовался алгоритм *Adaptive Frequency Sweep*. В силу его использования график получился более гладкий, чем он является на самом деле.

GPS-антенна напротив имеет ярко выраженный пик на частоте  $f = 1.576\text{Ghz}$ , что близко к реальной -  $f_{\text{реал}} = 1.575\text{Ghz}$ .

### 3.4.2. Поля в дальней зоне

Как видно из графика 3.9 поля имею схожую форму. Поле GPS-антенны не имеет дефектов.

Поле спиральной антенны имеет дефект, связанный с её асимметричностью. При этом данный момент трудно сказать, имеет ли это большое значение для её целевого использования.

### 3.4.3. Направленность поля

Магнитное поле спиральной антенны не выходит за пределы пластины. Электрическое поле распространяется на некоторую глубину в среду.

У GPS-антенны напротив, магнитное поле аналогично электрическому и распространяется достаточно глубоко, меняя фазу.

### 3.5. Выводы

- Резонансный график GPS-антенны показывает, что модель корректно моделирует физику СВЧ-антенн. Модель валидирована на GPS-антенне.
- Исходя из резонансного графика спиральной антенны видно, что необходима доработка модели с улучшением её геометрии.
- Поле спиральной антенны имеет дефект, связанный с её асимметричностью. При этом данный момент трудно сказать, имеет ли это большое значение для её целевого использования.
- GPS-антенна не подходит для диагностики плазмы. В условиях плазменного реактора её поле будет отражаться от стенок, внося нелинейность в зависимость резонансной частоты от  $\varepsilon$  среды. Исходя из этого, нельзя будет сказать, получим ли мы резонансную частоту, отражающую действительность.

## 4. Подведение итогов проделанной работы

### 4.1. Итоги и перспективы

На данный момент:

- Изучена на необходимом для начала работы уровне физика плазмы.
- Изучены на базовом уровне свойства СВЧ-излучателей.
- Проведён обзор статей по теме.
- Построены модели двух типов антенн.
- Физическая модель валидирована на GPS-антенне.
- Проведён анализ результатов моделирования физики.
- Получены навыки использования СВЧ-модуля и построения СВЧ-антенн в среде COMSOL.

На основе проведённой работы можно спланировать дальнейшие этапы реализации на качественном уровне:

1. Моделирование и оптимизация формы спиральной СВЧ-антенны.
2. Проверка гипотезы о непригодности GPS-антенны для использования в качестве диагностического зонда.
3. Создание модуля спиральной СВЧ-антенны для вставки его в реактор.
4. Исследование антенны в плазменном реакторе.

## Литература

1. R. L. Stenzel, Microwave resonator probe for localized density measurements in weakly magnetized plasmas, Rev. Sci. Instrum. 1 May 1976; 47 (5): 603–607
2. Gogna, Dr. Gurusharan Singh, Study of Resonance Hairpin Probe for Electron Density Measurements in Low Temperature Plasmas, 10.13140/2.1.4584.4165, 2012
3. H. J. Yeom, Flat cutoff probe for real-time electron density measurement in industrial plasma processing Plasma Sources Sci. Technol. 29 035016, 2020
4. D. W. Kim, Planar cutoff probe for measuring the electron density of low-pressure plasmas Plasma Sources Sci. Technol. 28 015004, 2019
5. А. А. Крушинин, Решение мультифизических СВЧ задач с помощью САПР COMSOL, 2016
6. Steven G. Johnson, Notes on Perfectly Matched Layers (PMLs), Created August 2007 updated August 12, 2021
7. Ю. П. Райзер, Физика газового разряда М.: Наука, 1987