

ОБЪЕМНЫЕ МИКРОВОЛНОВЫЕ РЕЗОНАТОРЫ С АЗИМУТАЛЬНОЙ СИММЕТРИЕЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЕ

Институт технической механики

*Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины,
ул. Лешко-Попеля, 15, 49005, Днепр, Украина; e-mail: mwave@ukr.net*

В роботі розглядається питання оцінки ефективності застосування об'ємних мікрохвильових резонаторів з азимутальною симетрією для оцінки концентрації електронів у низькотемпературній плазмі. При діагностиці низькотемпературної плазми у вільному просторі, як правило, відсутня явно виражена азимутально-симетрична форма області плазми, яка підлягає дослідженню. Тому більш ефективним є застосування частково відкритих азимутально-симетричних мікрохвильових резонаторів, які за рахунок конструктивних особливостей здатні забезпечити потрапляння згустків плазми довільної форми в їх об'єм. Обґрунтовано вибір циліндричного коаксialного чвертьхвильового і біконічного мікрохвильових резонаторів для вимірювання параметрів низькотемпературної плазми в умовах відсутності магнітних полів. Мета роботи – порівняльна оцінка максимально можливої чутливості резонансних параметрів коаксialного чвертьхвильового циліндричного і біконічного резонаторів до зміни об'ємної концентрації електронів у низькотемпературній плазмі. Методом кінцевих елементів проведено комп'ютерне моделювання електродинічних процесів в коаксialному чвертьхвильовому і біконічному мікрохвильовому резонаторах, які заповнено низькотемпературною плазмою. Отримано оцінки впливу зміни параметрів плазми на комплексні коефіцієнти відбиття і передачі електромагнітних хвиль в чвертьхвильовому коаксialному і біконічному резонаторах. Числові дослідження проводилися в припущенні, що об'ємна концентрація електронів в плазмі змінюється в діапазоні від $1 \cdot 10^{10} \text{ 1/м}^3$ до $1 \cdot 10^{13} \text{ 1/м}^3$. Показано ефективність застосування вимірювальних систем на основі досліджених мікрохвильових резонаторів для вимірювання концентрації електронів в низькотемпературній плазмі. Проведено порівняльний аналіз максимально можливої чутливості резонансних частот мікрохвильових резонаторів до зміни об'ємної концентрації електронів в плазмі. Показано, що очікувана найбільша чутливість резонансних параметрів мікрохвильового біконічного резонатора до зміни концентрації електронів в низькотемпературній плазмі у біконічного резонатора майже вдвічі вище, ніж у чвертьхвильового коаксialного резонатора.

В работе рассматривается вопрос оценки эффективности применения объемных микроволновых резонаторов с азимутальной симметрией для оценки концентрации электронов в низкотемпературной плазме. При диагностике низкотемпературной плазмы в свободном пространстве, как правило, отсутствует явно выраженная азимутально-симметричная форма исследуемой области плазмы. Поэтому более эффективным представляется применение частично открытых азимутально-симметричных микроволновых резонаторов, конструктивно обеспечивающих попадание сгустков плазмы произвольной формы в их объем. Обоснован выбор коаксиального четвертьволнового и биконического микроволновых резонаторов для измерения параметров низкотемпературной плазмы в отсутствии магнитных полей. Цель работы – сравнительная оценка максимально возможной чувствительности резонансных параметров коаксиального четвертьволнового цилиндрического и биконического резонаторов к изменению объемной концентрации электронов в низкотемпературной плазме. Методом конечных элементов проведено компьютерное моделирование электродинамических процессов в коаксиальном четвертьволновом и биконическом микроволновых резонаторах, заполненных низкотемпературной плазмой. Получены оценки влияния изменения параметров плазмы на комплексные коэффициенты отражения и передачи электромагнитных волн в четвертьволновом коаксиальном и биконическом резонаторах. Численные исследования проводились в предположении, что объемная концентрация электронов в плазме изменяется в диапазоне от $1 \cdot 10^{10} \text{ 1/м}^3$ до $1 \cdot 10^{13} \text{ 1/м}^3$. Показана эффективность применения измерительных систем на основе исследованных микроволновых резонаторов для измерения концентрации электронов в низкотемпературной плазме. Проведен сравнительный анализ максимально возможной чувствительности резонансных частот микроволновых резонаторов к изменению объемной концентрации электронов в плазме. Показано, что ожидаемая максимальная чувствительность резонансных параметров микроволнового биконического резонатора к изменению концентрации электронов в низкотемпературной плазме почти вдвое выше, чем у четвертьволнового коаксиального резонатора.

This paper considers the efficiency of azimuthally symmetric microwave cavities in assessing the electron density in a low-temperature plasma. In free-space low-temperature plasma diagnostics, the shape of the plasma area under study usually does not have any pronounced azimuthal symmetry. So the use of partially open microwave cavities, whose design allows arbitrarily shaped plasma blobs to penetrate inside them, seems to be more efficient. The choice of a coaxial quarter-wave and a biconical microwave cavity for low-temperature plasma characterization in the absence of magnetic fields is substantiated. The aim of this work is to compare the maximum possible sensitivity of the resonance parameters of a quarter-wave cylindrical and a biconical cavity to a variation in the electron density of a low-temperature plasma. Using the finite-element method, electrodynamic processes in a coaxial quarter-wave and a biconical microwave cavity filled with a low-temperature plasma were

© П. И. Заболотный, 2019

simulated. The effect of a variation in the plasma parameters on the complex coefficients of reflection and transmission of electromagnetic waves in the microwave cavities under study was estimated. The simulation was run for the plasma electron density ranging between 10^{10} m^{-3} and 10^{13} m^{-3} . The efficiency of the use of measuring systems based on the microwave cavities under study in low-temperature plasma electron density measurements was demonstrated. The maximum possible sensitivity of the resonance frequencies of the coaxial quarter-wave cavity to a variation in the plasma electron density was compared to that of the biconical cavity. It was shown that the expected maximum possible sensitivity of the resonance parameters of the biconical microwave cavity is almost twice that of the coaxial quarter-wave cavity.

Ключевые слова: микроволновые резонаторы, низкотемпературная плазма, концентрация электронов.

К числу наиболее распространенных и эффективных микроволновых методов контроля параметров плазмы относятся резонаторные с применением объемных резонаторов [1].

Известно, что объемным микроволновым резонатором называют ограниченный отражающими поверхностями объем, который имеет связь с внешним электромагнитным полем, обладает способностью накапливать электромагнитную энергию и характеризуется набором дискретных собственных частот [2]. Введение плазмы в резонатор приводит к изменению его резонансной частоты и добротности. Измеряя сдвиг резонансной частоты и изменение добротности, можно определить активную и реактивную составляющие проводимости плазмы и связанные с этими составляющими концентрации и частоту столкновений электронов.

Для исследования плазмы возможно использование любых типов объемных резонаторов: цилиндрических, прямоугольных, конических, тороидальных и т. д. Наибольшее распространение получили цилиндрические резонаторы, поскольку в большинстве экспериментальных установок плазменный пучок имеет цилиндрическую симметрию, что обеспечивает его проникновение в полость закрытого резонатора.

Однако в ряде случаев существует необходимость диагностики низкотемпературной плазмы без явно выраженной азимутально-симметричной формы исследуемой области плазмы. Поэтому более эффективным представляется применение частично открытых азимутально-симметричных микроволновых резонаторов, конструктивно обеспечивающих попадание сгустков плазмы произвольной формы в их объем.

К таким резонаторам можно отнести четвертьволновой коаксиальный резонатор и частично открытый биконический резонатор. Безусловно, что при диагностике такими резонаторами плазма не будет полностью занимать весь объем резонаторов. Однако практический интерес представляет сравнительная оценка максимально возможной чувствительности резонаторов к изменению концентрации электронов, которую можно получить при моделировании в предположении полного заполнения плазмой их объемов.

Классический четвертьволновой коаксиальный резонатор состоит из металлического цилиндра (наружного проводника), по оси которого располагается круглый металлический стержень.

С одной из сторон резонатор ограничен металлическим основанием, а с другой стороны открыт в окружающее пространство. Возбуждение электромагнитных колебаний в объеме резонатора и контроль параметров колебаний выполняются с помощью петель, установленных симметрично центрального стержня. Эскиз проекции продольного осевого сечения одной из типовых конструкций четвертьволнового резонатора показан на рис. 1.

Частотный спектр классического четвертьволнового коаксиального резонатора характеризуется малым разном частот первого и второго резонансов, что обычно позволяет использовать его исключительно в схемах с исследованием амплитудно-частотных характеристик для определения диэлектрической постоянной заполняющей его среды. Причем диапазон изменения



Рис. 1

диэлектрической проницаемости (ДП) заполняющей среды должен быть заранее однозначно задан. Как правило, это возможно, если значение диэлектрической проницаемости заполняющей среды изменяется в незначительном диапазоне. В случае измерений в низкотемпературной плазме с концентрацией электронов от $1 \cdot 10^{10} \text{ 1/м}^3$ до $1 \cdot 10^{13} \text{ 1/м}^3$ это условие выполнимо. ДП плазмы в этом случае изменяется в пределах от 0,996 до 0,75.

Принципиально можно увеличить максимальную величину измеряемых концентраций путем перехода на высшие моды колебаний с более высокой резонансной частотой. Тогда ограничение, связанное с величиной критической концентрации, сдвигается в область более высоких концентраций. Однако расстояния между соседними резонансными частотами при использовании колебаний высших типов уменьшаются и существенными становятся ограничения на разреженность спектра собственных колебаний.

Ограничения, связанные с большой плотностью спектра собственных колебаний, можно преодолеть путем использования открытых резонаторов, частично открытых резонаторов, а также резонаторов с коническими образующими.

С этой точки зрения весьма перспективным для диагностики плазмы представляется применение биконических резонаторов (БКР). Эти резонаторы относятся к классу частично открытых аксиально-симметричных микроволновых резонаторов с поперечным сечением, которое изменяется по линейному закону. Поэтому в их объеме наблюдаются азимутально-симметричные колебания магнитного типа [3]. На этих типах колебаний обеспечивается наибольшая добротность, приблизительно в полтора раза больше добротности регулярных волноводных резонаторов аналогичных размеров.

Кроме того, наличие конических образующих в БКР снимает вырождение (совпадение частот) типов колебаний H_{011} и E_{111} , которое свойственно для цилиндрических резонаторов. Снятие вырождения между типами колебаний H_{011} и E_{111} , априори, расширяет диапазон измерений концентраций

электронов в область более высоких значений без перехода на высшие типы колебаний.

Также в БКР существуют такие поперечные сечения, за пределы которых не распространяются электромагнитные колебания основной рабочей частоты резонатора. Области резонаторов, расположенные далее (от центра резонатора), называют закритичными областями или закритичными участками. Наличие закритичных участков позволяет без существенных потерь для качества резонансной системы создавать отверстия для введения плазмы в объем резонатора.

На рис. 2 показаны эскизы поперечного и продольного сечения трехмерной проекции БКР. В данном случае биконический резонатор включен между двумя прямоугольными волноводными линиями 1 и 2 для подведения и отвода электромагнитных колебаний. Возбуждение колебаний в резонаторе осуществляется через отверстия связи 3. Связь с окружающей средой и введение в объем резонатора исследуемой среды (в рассматриваемом случае – плазмы) осуществляется через отверстия связи 4.

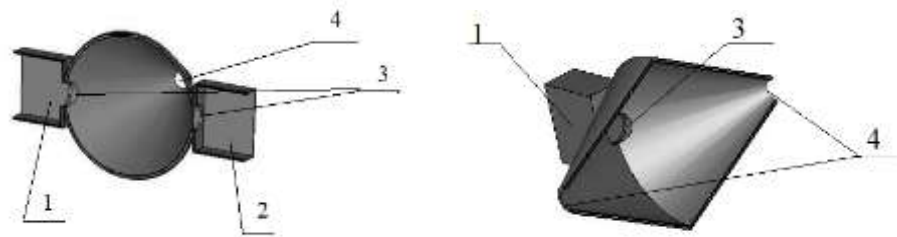


Рис. 2

Целью данной работы является сравнительная оценка максимально возможной чувствительности резонансных параметров коаксиального четвертьволнового цилиндрического и биконического резонаторов к изменению объемной концентрации электронов в низкотемпературной плазме.

В [4] отмечалось, что любой выбранный микроволновый метод должен учитывать частотную дисперсию электромагнитных волн и быть достаточно чувствительным к изменению контролируемого параметра плазмы. Понимание особенностей частотной дисперсии электромагнитных волн в области рабочих частот резонаторов с учетом их конструктивных особенностей и соответственно особенностей взаимодействия электромагнитных колебаний в объеме резонатора с плазмой позволит обеспечить его более высокую чувствительность.

Частотная дисперсия изотропной низкотемпературной плазмы при отсутствии магнитных полей и в слабых магнитных полях в значительной степени определяется ее диэлектрической проницаемостью. В случае моделирования взаимодействия электромагнитных волн микроволнового диапазона с низкотемпературной плазмой можно допускать, что она изотропна и влияние ионов на диэлектрическую проницаемость несущественно.

Как следствие, в данных исследованиях при разработке расчётных моделей электродинамических процессов полагалось, что плазма полностью заполняет объем микроволновых резонаторов и окружающее их пространство, а на величину эффективной относительной диэлектрической проницаемости

плазмы основное влияние оказывают электроны. Точнее, их эффективная концентрация N , определяющая значение плазменной частоты [4] в соответствии с выражением

$$f_p = \sqrt{\frac{Ne^2}{4\pi^2 m_e \epsilon_0}},$$

где N – концентрация электронов в плазме; e – заряд электрона; m_e – масса электрона; ϵ_0 – диэлектрическая постоянная.

Тогда величина относительной диэлектрической проницаемости плазмы при численном моделировании может быть определена из выражения

$$\epsilon = 1 - \frac{f_p^2}{f^2},$$

где f_p – плазменная частота; f – частота электромагнитных волн.

Основными параметрами, отражающими изменение концентраций электронов и, как следствие, относительной диэлектрической проницаемости плазмы, являются частотные зависимости комплексных коэффициентов отражения и передачи электромагнитных волн по напряжению между волновыми портами (элементами возбуждения и детектирования электромагнитных колебаний).

В общем случае исследования частотных зависимостей комплексных коэффициентов отражения и передачи сверхвысокочастотных цепей могут быть выполнены аналитически с использованием общей теории многополюсников и проведением расчетов в матричном виде. Особенно продуктивен метод анализа с использованием матриц рассеяния [5].

Однако аналитические подходы не позволяют учитывать конструктивные особенности реальных микроволновых резонаторов для диагностики параметров плазмы. Также эти методы не позволяют учитывать изменение локальных характеристик плазмы при распространении электромагнитных волн между волновыми портами диагностических устройств. В свою очередь, современные численные методы решают эти проблемы с достаточно высокой точностью. Они позволяют для расчетов использовать как точные, так и упрощенные двух- или трехмерные модели конструкций измерительных систем, а также достаточно гибко варьировать параметрами плазмы и граничными условиями.

Численные исследования коэффициентов отражения и передачи электромагнитных волн в объемных резонаторах, заполняемых плазмой, могут быть сведены к оценке влияния параметров модельной плазмы на фазовые и амплитудные характеристики зондирующего сигнала, который качается по частоте или по мощности.

Расчет влияния изменения параметров низкотемпературной плазмы на комплексные коэффициенты отражения и передачи электромагнитных волн в четвертьволновом коаксиальном и БКР резонаторах был выполнен с помощью метода конечных элементов [6, 7].

Численные исследования проводились в предположении, что объемная концентрация электронов изменялась в диапазоне от $1 \cdot 10^{10} \text{ 1/м}^3$ до $1 \cdot 10^{13} \text{ 1/м}^3$. Это соответствует изменению относительной диэлектрической проницаемости в диапазоне приближенно от 0,994 до 0,870. Пространство модели, в котором распро-

страняются электромагнитные волны, разбивалось на простейшие объемные элементы, имеющие форму тетраэдров – расчетную сетку. Размер тетраэдра выбирался таким образом, чтобы поле в его пределах можно было описать простой функцией или набором функций с неизвестными коэффициентами.

Максимальный линейный размер элементов расчетной сетки не превышал 0,01 от максимального размера резонатора. Для объемных резонаторов – это максимальный размер поперечного сечения.

На рис. 3 показаны трехмерная проекция и эскиз продольного сечения расчетной модели цилиндрического четвертьволнового коаксиального резонатора.

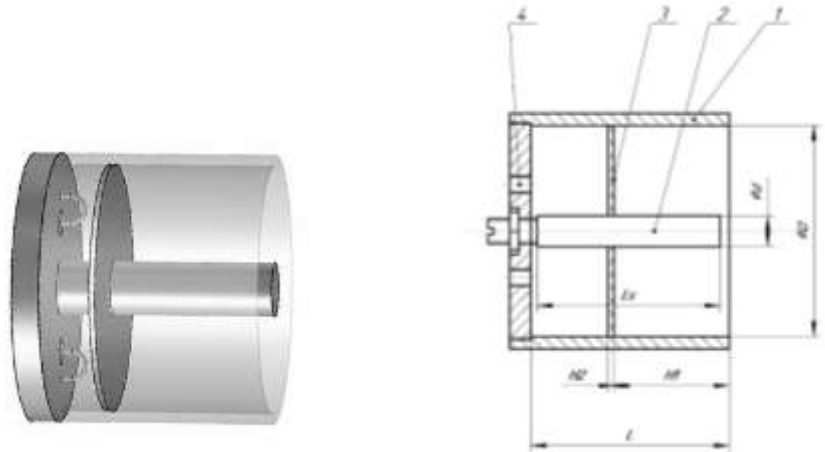


Рис. 3

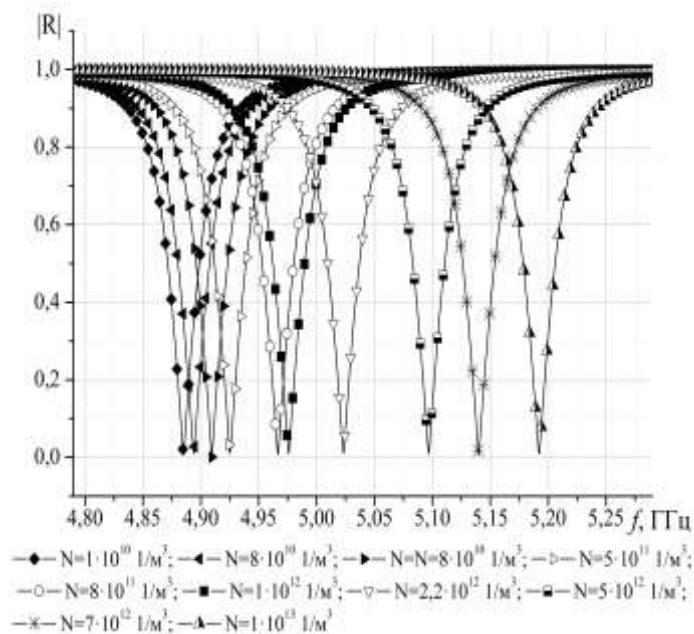
Рассмотренный в данном исследовании вариант – это модель почти классического резонатора. Отличием является лишь то, что для защиты от прямого контакта зарядов плазмы с петлями связи (магнитный диполь), которые устанавливаются в отверстия 4 дна корпуса резонатора, объем резонатора разделен на две части тонкой диэлектрической мембраной 3 из тефлона (Ф-4).

При моделировании предполагалось, что корпус 1 и стержень 2 выполнены из меди, пространство между центральным стержнем и корпусом резонатора до мембраны 3 полностью заполнено плазмой с заданными параметрами. Очевидно, что местоположение мембраны 3 в значительной степени определяет количество плазмы, которая может попасть в объем резонатора и соответственно влияет на чувствительность резонатора. Поэтому при расчетах принималось, что мембрана 3 расположена в плоскости поперечного сечения, удаленной от основания резонатора на расстояние $H1 = L/2$.

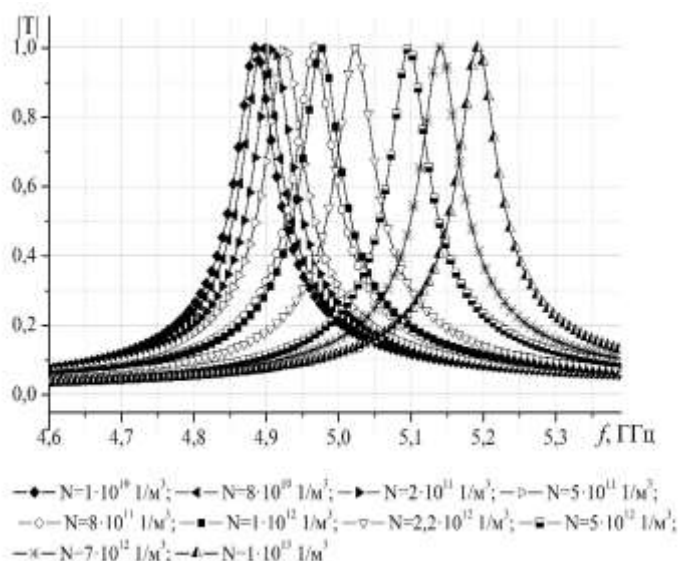
Расчеты проводились для резонатора с рабочими частотами в диапазоне от 4,6 ГГц до 5,2 ГГц, которые обеспечиваются следующими геометрическими размерами его элементов: диаметром полости резонатора $D=50$ мм; длиной стержня $L_x=50$ мм; диаметром стержня $d=10$ мм; $H1=25$ мм; толщиной защитной мембраны $H2=1$ мм.

На рис. 4 показаны полученные при моделировании частотные зависимости модулей коэффициента отражения $|R|$ (рис. 4, а)) и передачи $|T|$ (рис. 4, б)) для поперечных электромагнитных колебаний при различных концентрациях электронов в плазме.

Значения частот резонатора, соответствующие минимуму модуля коэффициента отражения и максимуму модуля коэффициента передачи, при одинаковой концентрации электронов в плазме равны и соответствуют резонансной частоте. Как видно из представленных графически результатов расчетов, для выбранной конструкции и габаритных размеров резонатора изменение концентрации электронов в плазме в заданном диапазоне приведет к изменению его резонансной частоты в диапазоне от 4,876 ГГц до 5,182 ГГц.



а)



б)

Рис. 4

На рис. 5 графически представлена зависимость резонансной частоты f_{res} четвертьволнового коаксиального резонатора от объемной концентрации N электронов в плазме.

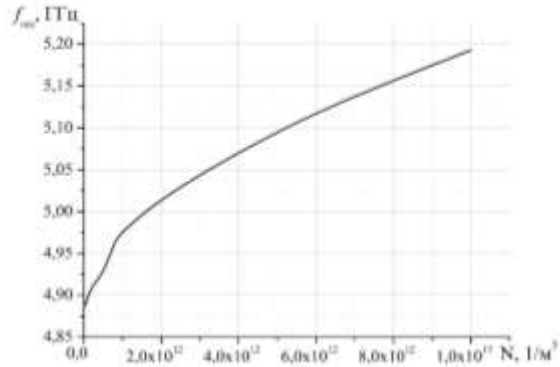


Рис. 5

Анализ полученных данных показал, что диапазон перестройки резонансных частот при изменении концентрации электронов в плазме от $1 \cdot 10^{10}$ $1/\text{м}^3$ до $1 \cdot 10^{13}$ $1/\text{м}^3$ составит величину, близкую к 0,307 ГГц. Оценка максимально возможной чувствительности резонансной частоты к изменению концентрации электронов в плазме на 10^6 $1/\text{м}^3$ на линейном участке дала величину, близкую к 30,5 МГц.

На рис. 6 показано продольное сечение БКР, рассмотренного при моделировании электродинамических процессов, происходящих в его объеме, при заполнении плазмой.

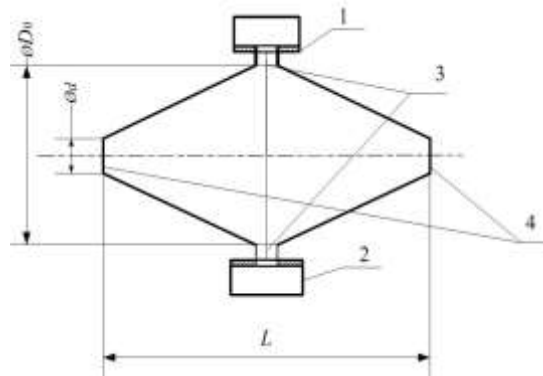


Рис. 6

Как видно из рис. 6, в исследованной модели биконический резонатор длиной L и диаметром оснований конических элементов резонатора D_0 включен между двумя прямоугольными волноводными линиями 1 и 2 по схеме «на проход». Возбуждение колебаний в резонаторе осуществляется через отверстие связи в торце волновода 1.

Контроль параметров колебаний, прошедших через объем резонатора, осуществляется в волноводной линии 2, которую с БКР соединяет второе отверстие связи. Связь с окружающей средой (плазмой) и обеспечение ее проникновения в объем резонатора осуществляется благодаря двум отверстиям связи 4, расположенным на вершинах усеченных конических элементов.

При расчетах принималось, что диаметр основания конических элементов $D_0=50$ мм, диаметр поперечного сечения полости резонатора в области

отверстий связи для связи с внешней средой $d=6$ мм. Длина БКР $L=76$ мм. При таких геометрических размерах рабочая частота резонатора располагается в диапазоне от 8 ГГц до 10 ГГц.

Расчеты проводились для первой основной моды колебаний. Как уже отмечалось, основным типом колебаний резонатора является магнитный – H_{011} . При компьютерном моделировании были получены частотные зависимости комплексных коэффициентов отражения и передачи по напряжению между входным и выходным отверстиями 3 БКР.

На рис. 7, а) и 7, б) соответственно представлены графики частотных зависимостей модулей коэффициентов отражения $|R|$ и передачи $|T|$ от концентрации электронов в низкотемпературной плазме, заполняющей объем БКР.

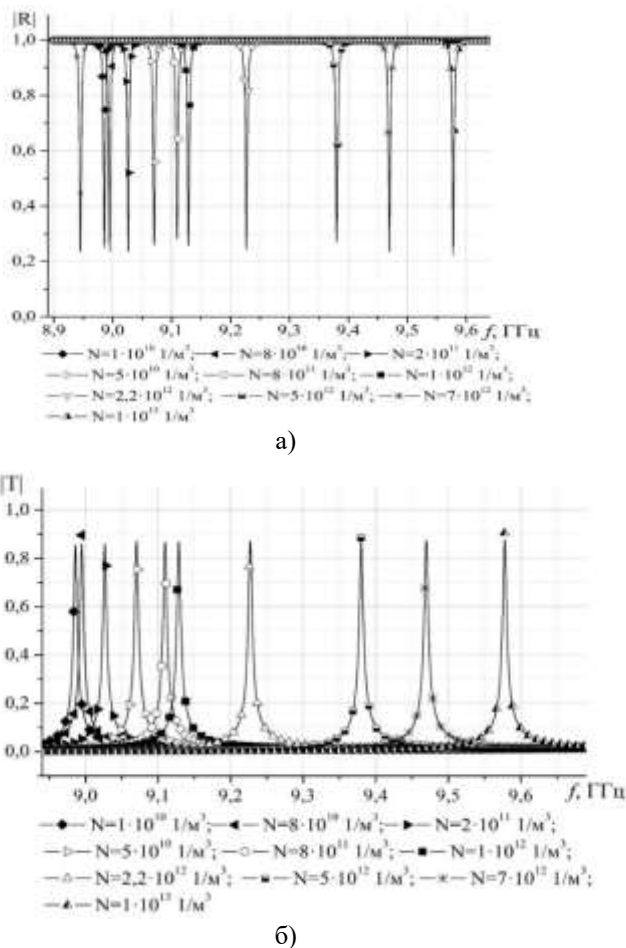


Рис.7

Как и в случае моделирования электродинамических процессов в четвертьволновом коаксиальном резонаторе, изменения концентрации электронов для модели плазмы задавались в диапазоне от $1 \cdot 10^{10} \text{ 1/м}^3$ до $1 \cdot 10^{13} \text{ 1/м}^3$.

Анализ результатов, представленных на рис. 7 в виде графиков, показал, что изменение концентрации электронов в плазме приводит к изменению частоты резонансных колебаний в диапазоне от 8,94 ГГц до 9,56 ГГц.

Соответственно ширина диапазона изменения резонансных частот БКР составила 0,62 ГГц. Результаты расчетов зависимости резонансных частот f_{res}

БКР от объемной концентрации N электронов в низкотемпературной плазме представлены графически на рис. 8.

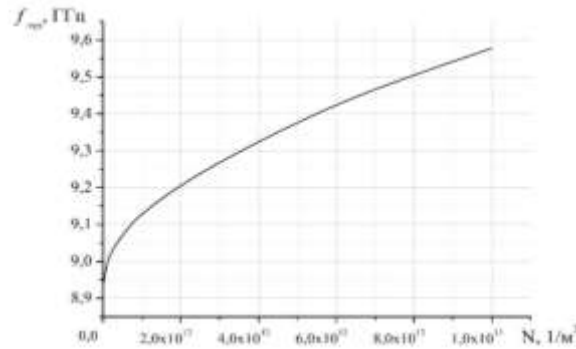


Рис. 8

Оценка значения максимально возможной чувствительности резонансной частоты резонатора к изменению концентрации на величину 10^6 $1/m^3$ в диапазоне концентраций электронов от $2,5 \cdot 10^{12}$ $1/m^3$ до $1,0 \cdot 10^{13}$ $1/m^3$ (на участке с формой кривой, близкой к линейной) показала величину близкую к 62,6 МГц. При более низких концентрациях электронов оценка показала значение не менее 1 МГц.

Полученные результаты позволяют предположить, что ожидаемая максимально возможная чувствительность микроволнового БКР к изменению концентрации электронов в низкотемпературной плазме почти вдвое выше, чем у четвертьволнового коаксиального резонатора. Это свидетельствует о высокой потенциальной возможности применения БКР для диагностики концентраций электронов в низкотемпературной плазме.

Выводы. Проведено компьютерное моделирование электродинамических процессов в коаксиальном четвертьволновом и биконическом микроволновых резонаторах, заполненных низкотемпературной плазмой. Показана эффективность их применения для измерения концентрации электронов в низкотемпературной плазме. Получена сравнительная оценка максимально возможной чувствительности резонансных частот микроволновых четвертьволнового цилиндрического коаксиального и биконического резонаторов к изменению объемной концентрации электронов в низкотемпературной плазме. Показано, что ожидаемая максимально возможная чувствительность микроволнового БКР к изменению концентрации электронов в низкотемпературной плазме почти вдвое выше, чем у четвертьволнового коаксиального резонатора.

1. Голант В. Е. Сверхвысокочастотные методы исследования плазмы. М.: Наука, 1968. 327 с.
2. Makimoto M., Yamashita S. Microwave resonators for wireless communication. Theory, design and application. Verlag Berlin: Springer, 2001. 162 p.
3. Drobakhin O. O., Zabolotny P. I., Privalov E. N. Influence of the Dimensional and Form Precision of the Constructional Elements of Biconical Coaxial Microwave Resonator of the Parameter of Sensor of Movement. Telecommunications and Radio Engineering. 2009. № 68(9). P. 827–833.
4. Хилд М., Уортон Ч. Микроволновая диагностика плазмы. М.: Атомиздат, 1968. 392 с.
5. Лебедев И. В. Техника и приборы СВЧ. М.: Высшая школа, 1972. 374 с.
6. Сильвестер П., Феррари Р. Метод конечных элементов для радиоинженеров и инженеров-электриков. М.: Мир, 1986. 229 с.
7. Курушин А. А., Пластиков А. Н. Проектирование СВЧ устройств в среде CST Microwave Studio. М.: Издательство МЭИ, 2010. 160 с.

Получено 06.02.2019,
в окончательном варианте 28.02.2019