

УДК 681.7.068:530.182 + 681.7.068.539.9

**ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАНСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СВЧ ПЛАЗМОТРОНА НА ВОЛНЕ  $TE_{11}$  ( $H_{11}$ ) ДЛЯ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ НА КВАРЦЕВЫЕ СТЕРЖНИ (ТРУБЫ, ЗАГОТОВКИ) ОПТИЧЕСКИХ СТРУКТУР СПЕЦИАЛЬНЫХ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ НА ОСНОВЕ КВАРЦЕВОГО СТЕКЛА, ЛЕГИРОВАННОГО ФТОРОМ И АЗОТОМ, В НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЕ РЕЗОНАНСНОГО ЛОКАЛЬНОГО СВЧ-РАЗРЯДА ПОНИЖЕННОГО ДАВЛЕНИЯ**

Л. М. Блинов<sup>1</sup>, А. П. Герасименко<sup>3</sup>, А. П. Долгов<sup>3</sup>, Л. Ю. Кочмарев<sup>2</sup>,  
В. А. Черепенин<sup>1</sup>, И. П. Шилов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, 125009, Москва,  
Моховая, 11-7

<sup>2</sup> Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники  
им. В.А. Котельникова РАН, 141120, г. Фрязино Московской области, пл. Введенского 1

<sup>3</sup> ОАО «Радиотехнический институт имени академика А.Л. Минца», 127083, Москва, ул.  
8-го Марта, 10-1

Статья поступила в редакцию 20 декабря 2016 г.

**Аннотация.** В работе представлены результаты исследований резонансных характеристик резонаторного СВЧ плазматрона на виде колебаний  $TE_{111}$  (“холодные” и “горячие” измерения). Предложены методика и измерительные стенды для проведения измерений.

**Ключевые слова:** СВЧ плазма, резонаторный плазматрон, резонанс, апертура, световод, кварцевое стекло, слои, легированные фтором, мощность СВЧ, частота.

**Abstract.** In this paper we presented some results of research made on a resonator microwave plasmatron, working on  $H_{111}$  mode at low oxygen pressure, to investigate its resonance features. In the beginning the setting into resonance of non-loaded resonator algorithm is described (so-called, “cold measurements”). It is carried out using adjusting quartz glass rods, placed into a resonant cavity through special holes, located equidistantly in azimuthal direction. Such setting is done at different frequencies; it sets relation between space location of rods and resonance frequency

of the plasmatron at low power level. Next, an ignition of plasma is made through input to plasmatron of high microwave power from a generator having a constant frequency. In this case resonator is loaded to low-pressure, non-equilibrium UHF-discharge plasma (so-called, "hot measurements"). Monitoring results of rejected power, we adjusted resonator by quartz rods such as to achieve its minimum, which corresponds to maximum of absorbed power. We show three curves of relation between a power, absorbed in plasma, and configuration of setting rods, uniquely related in cold measurements with some resonance frequency. These frequency values are abscissas of curves points. Three curves are showed for three different values of pressure. This results confirm the assumption that plasma-loaded resonator plasmatron saves a good expressed resonance character, but with significantly increased curve's width. Therefore, during the technological process continuous monitoring and stabilization of the resonant mode is required.

**Key words:** microwave plasma, microwave plasmatron, resonance, aperture, optical fiber, silica glass, layers, doped by fluorine, microwave power, frequency.

## 1. Введение

Кварцевые волоконные световоды широко используются в диапазоне 190-2200 нм. Это волоконно-оптические линии связи, волоконно-оптические датчики измерения различных физических величин, лазерная обработка материалов, лазерная медицина, волоконные лазеры и усилители. Для работы в экстремальных условиях (наличие естественного радиационного и повышенного фона ионизирующих излучений, высоких и низких температур, агрессивной среды, механических и ударных нагрузок) разрабатываются специальные волоконные световоды. Области применения специальных световодов: атомная энергетика, авиация и космонавтика, специальные радиофотонные РЛС, шахты, нефтегазовая отрасль, некоторые направления в медицине, военные применения.

Для создания специальных кварцевых волоконных световодов перспективны неизотермические плазмохимические технологии изготовления

волоконных световодов на основе использования резонансных неравновесных СВЧ-разрядов пониженного давления (PCVD и POVD методы [1,2]).

## **2. Выбор конструкции СВЧ плазмотрона**

Плазмотрон является основным рабочим органом в технологиях PCVD и POVD, создающим и определяющим условия протекания гетерогенного плазмохимического процесса осаждения чистого или легированного кварцевого стекла на поверхность кварцевой трубы, стержня, заготовки [1].

Однако в настоящее время отсутствует какая-либо теоретическая модель, которая позволила бы надежно выбирать, в зависимости от поставленной задачи, основные параметры плазмотрона – тип волны, рабочую частоту, подводимую мощность, геометрию и способы его настройки. Конструкция плазмотронов отрабатывается эмпирическим путем на макетах, методом последовательных приближений.

Основная сложность при этом заключается в том, что необходимость получить достаточно высокие значения  $E/p$  (где  $E$  – напряженность электрического поля волны в плазме,  $p$  – давление в разряде) требует использования плазмотронов резонаторного типа, работающих на стоячей волне, в максимуме электрического поля которой располагается кварцевая труба или стержень. Однако, эти плазмотроны очень чувствительны к заполняющим их средам, согласование их с генератором носит резонансный характер и требует механизмов настройки плазмотрона.

На резонансную частоту плазмотрона влияет также заполнение его кварцевыми деталями – опорной трубой, стержнем, экранной трубой – все эти элементы сдвигают рабочую частоту в сторону ее уменьшения, в то время как плазма несколько ее повышает (в зависимости от типа волны на 3-5%).

Плазмотрон должен обеспечивать:

1. Высокую скорость осаждения кварцевого стекла, в том числе, легированного фтором и азотом.

2. Высокую эффективность легирования и использование исходных химических реагентов.

3. Высокую равномерность и однородность геометрии осаждаемых кварцевых слоев, а также однородность концентрации легирующих добавок в слоях (азимутальную и аксиальную) и их высокую воспроизводимость.

4. Высокий коэффициент передачи СВЧ энергии в разрядный объем плазмы в диапазоне мощности СВЧ от сотен ватт до единиц киловатт и постоянство удельного энерговклада в разрядном объеме в резонансном режиме работы.

5. Сохранение работоспособности в условиях воздушной среды, нагретой до температуры 1200-1300°C.

6. Слабую чувствительность, либо отсутствие ее, к эксцентриситету трубки, стержня и плазмотрона.

7. Иметь минимальные габариты для снижения тепловых потерь и габаритов станка.

К перечисленным требованиям, важно добавить возможность помещения в осевую область резонатора кварцевой трубы большого диаметра (до 50 мм, в том числе, с кварцевым стержнем по оси трубы диаметром до 28 мм). Только в этом случае такая резонансная структура может представлять практический интерес с точки зрения перспективы выхода в дальнейшем на промышленное производство специального оптического волокна.

Таким требованиям удовлетворяет разработанная резонаторная конструкция СВЧ плазмотрона на низшем типе волны  $H_{11}$  в цилиндрическом полом или коаксиальном волноводе.

### **3. Плазмотрон на волне $TE_{11}$**

Наш выбор этого типа волны, не обладающего азимутальной симметрией, основан на следующих особенностях:

1.  $TE_{11}$  является низшим типом волны в круглом волноводе и вторым (после  $TEM$ ) в коаксиальном. Отсутствие каких-либо компонент полей,

совпадающих по направлению и фазе у этих двух типов волн, делает возможным одномодовый режим работы плазмотрона на волне типа  $TE_{11}$  при волноводном возбуждении.

2. Волна  $TE_{11}$  имеет максимальное значение вектора Пойнтинга  $\bar{P}$  на оси волновода, что хорошо стабилизирует разряд на оси при любых возмущающих воздействиях. При этом, если в незаполненном резонаторе  $\bar{P}z=0$  из-за дополнительного сдвига фазы между  $\bar{E}$  и  $\bar{H}$  на  $\pi/2$ , то в резонаторе, заполненном поглощающей плазмой  $\bar{P}z \neq 0$  и имеет максимум на оси.

3. Волна  $TE_{11}$  в коаксиальной структуре, каковой является цилиндрический резонатор с проводящей плазмой на оси, практически не трансформируется в волну  $TEM$ , что снижает выход СВЧ энергии через боковые отверстия плазмотрона и по диэлектрическим кварцевым элементам (трубке, стержню).

4. Волна  $TE_{11}$  обеспечивает максимальный энерговклад в плазму СВЧ-разряда, в связи с чем именно в этом случае вероятнее всего получить максимальные значения  $E$  при минимальных вкладах СВЧ мощности.

5. Неоднородность осаждения может быть снята вращением трубки и стержня, а также круговой поляризацией вектора  $E$  или вращением плоскости поляризации.

6. Плазмотрон на волне  $TE_{11}$  (резонатор на виде колебаний  $H_{111}$ ) имеет малые габариты.

Принципиальная схема резонаторного СВЧ плазмотрона на виде колебаний  $H_{111}$ , а также распределение электрического поля в нём, приведены на рис. 1.

Последовательность осуществления резонансного режима работы СВЧ плазмотрона  $H_{111}$  поясняется на рисунке 1.

В резонаторе 2 устанавливается соосно оси резонатора толстостенная (8-10 мм и более) кварцевая или фторсиликатная труба 4, и от источника СВЧ энергии 1 возбуждаются в резонаторе колебания вида  $H_{111}$ . При пониженном давлении (1-20 Тор) в кварцевой трубе, создаваемом вакуумной системой 8,

формируется локальная зона плазмы резонансного СВЧ-разряда пониженного давления 5. Резонансный режим работы такой конструкции резонаторного СВЧ плазмотрона обеспечивается предварительной настройкой резонатора с помощью перемещаемых металлических экранирующих цилиндров 3 (емкостная настройка), перемещением короткозамыкающих поршней 6 (индуктивная настройка), и/или кварцевых стерженьков (на рисунке не показаны) необходимых размеров и конфигураций.

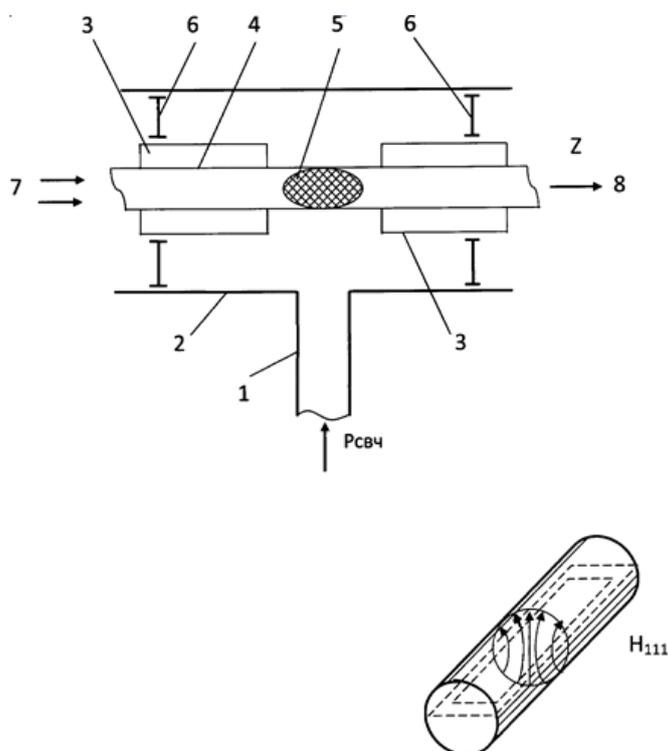


Рис.1. Принципиальная схема резонаторного СВЧ плазмотрона на виде колебаний  $H_{111}$  и распределение электрического поля в нём

Горизонтальный и вертикальный разрез использованного нами образца резонатора вышеописанного типа  $H_{111}$ , приводятся на рис. 2 и рис. 3, соответственно.

На рис. 2 использованы следующие обозначения: I – внешний корпус резонатора с защитным водяным охлаждением; II – прямоугольный волновод сечением  $72 \times 20$ , возбуждающий резонатор волной  $H_{10}$ ; III – боковая цилиндрическая стенка резонатора; IV – плоские вертикальные стенки,

ограничивающие резонатор по длине, с отверстиями для регулирующих элементов; V – металлические трубки, ограничивающие длину СВЧ-разряда; VI – трубчатые поглотители из графита, препятствующие выходу СВЧ излучения за пределы резонатора. Внутренний диаметр боковой цилиндрической стенки III равен  $2R$ , где  $R$  – радиус резонатора. Расстояние между плоскими вертикальными стенками IV равно длине резонатора  $L$ . Эти два параметра ( $R$  и  $L$ ) определяют резонансную длину волны резонатора.

На рис. 3 изображён вертикальный разрез резонатора, на нём видны 12 отверстий диаметром 8 мм, симметрично расположенные по окружности, которые служат для регулировки резонансной длины волны посредством введения в них кварцевых стерженьков. Азимутальное распределение электрического поля в резонаторе такого типа несимметрично (оно преимущественно направлено вертикально, от отверстия 7 к отверстию 1, как и в возбуждающей волне  $H_{10}$  в прямоугольном волноводе – см. рис. 1). Поэтому имеет значение расположение каждого стерженька и каждому из них присвоен свой номер.

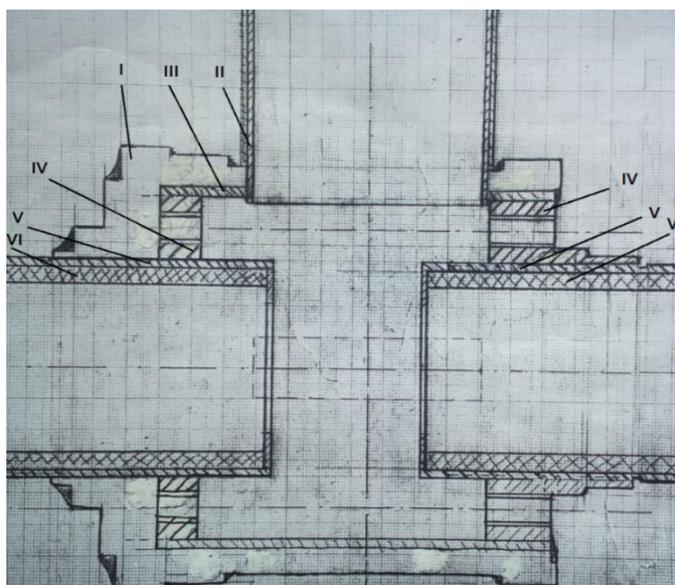


Рис. 2. Горизонтальный разрез цилиндрического резонатора на виде колебаний  $H_{111}$  с прямоугольным волноводом, возбуждающим его волной  $H_{10}$

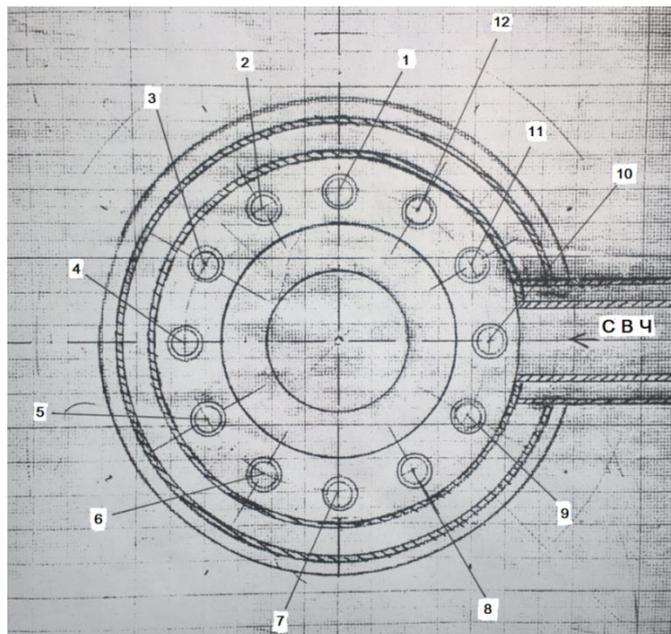


Рис. 3. Вертикальный разрез цилиндрического резонатора  $H_{111}$  с прямоугольным волноводом, возбуждающим его волной  $H_{10}$ . Цифры означают нумерацию регулирующих стерженьков с привязкой к геометрии конструкции

#### 4. “Холодные” измерения на резонаторе типа $H_{111}$

Целью данного этапа работы является предварительная настройка резонатора на виде колебаний  $H_{111}$  с опорной кварцевой трубой (ОКТ), на частоту магнетронного генератора СВЧ с помощью различных элементов, регулирующих резонансную частоту резонатора. Дальнейшая настройка резонатора с рабочей ОКТ, нагруженного на плазму СВЧ-разряда, производится в волноводном тракте большой мощности.

При проведении «холодных» измерений параметров резонатора  $H_{111}$ , в данной работе, определялась зависимость его резонансной частоты, при различных диаметрах опорных кварцевых труб (ОКТ), размещенных на оси резонатора, от количества и расположения используемых регулирующих элементов (стерженьки из кварцевого стекла). Был создан стенд для проведения «холодных» измерений, на котором исследовались параметры резонатора, при этом на оси резонатора размещались поочередно ОКТ различных диаметров -

20 мм, 24 мм, 30 мм и 42 мм. В качестве регулирующих элементов использовались кварцевые стерженьки.

Принципиальная схема стенда для предварительной настройки резонатора приведена на рис. 4.

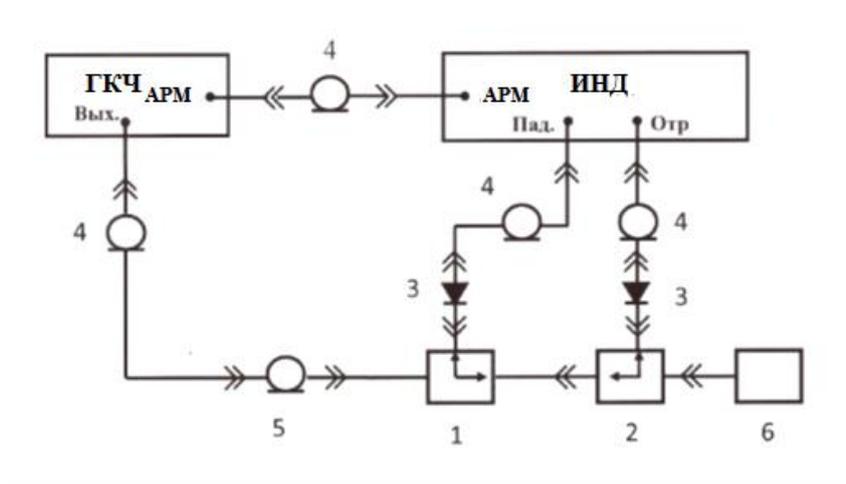


Рис. 4. Стенд для измерения частотной зависимости КСВ резонатора

ГКЧ – генератор качающейся частоты ГКЧ - 57, ИНД – индикатор КСВН и ослабления Я2Р – 67, 1, 2 – направленные ответвители, 3 – детекторные головки, 4 – СВЧ – кабели, 5 – КВП, 6 – исследуемая нагрузка (резонатор)

СВЧ сигнал с генератора качающейся частоты ГКЧ подаётся через кабель 4 и кабельно-волноводный переход (КВП) 5 на тракт из волновода прямоугольного сечения, работающего на волне  $H_{10}$ , состоящий из двух секций, каждая из которых содержит направленный ответвитель. При таком соединении секций, при котором, как на рис. 4, выходы ответвителей 1 и 2 направлены встречно, с выхода 1 снимается сигнал, пропорциональный входному, падающему СВЧ сигналу, а с выхода 2 – сигнал, пропорциональный сигналу, отражённому от исследуемой нагрузки. Первый сигнал, после детектирования, подаётся на вход “Пад.” индикатора Я2Р – 67, а второй сигнал, также после детектирования подаётся на вход “Отр.” того же индикатора. Временные зависимости амплитуд падающей и отражённой волн, синхронизованные с пилообразным напряжением с выхода ГКЧ, подаваемым на горизонтальную развёртку индикатора, в соответствии с которым изменяется во времени частота СВЧ сигнала, после соответствующей обработки, образуют

временную зависимость коэффициента стоячей волны (КСВ) волноводного тракта с исследуемой нагрузкой, подаваемую на вертикальную развертку экрана индикатора. На экране получается осциллограмма частотной зависимости КСВ (рис. 5), на которой видны две метки - одна на минимуме КСВ (резонансная частота с ОКТ и регулируемыми элементами), а другая на частоте собственного резонанса резонатора  $H_{111}$  – 2430 МГц. Размещение кварцевых стерженьков в полости резонатора, как и размещение внутри резонатора, соосно с ним, ОКТ, приводит к увеличению эффективной диэлектрической проницаемости в полости резонатора, и понижению его резонансной частоты. Чем больше энергия поля в области введения настроечного элемента, тем сильнее он влияет на резонансную частоту.

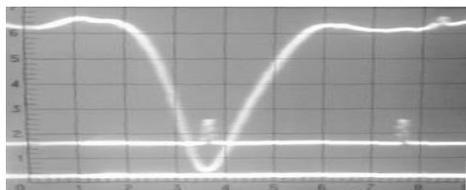


Рис. 5. Осциллограмма зависимости КСВ от частоты

Частота, соответствующая минимуму КСВ и является резонансной частотой.

У резонатора, представленного на рис. 2, длина резонаторной полости составляет 89 мм, а диаметр - 110 мм. При этом резонансная частота для моды  $H_{111}$ , согласно формуле:

$$f_p = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{\pi}{l}\right)^2 + \left(\frac{1,84}{R}\right)^2} \quad (1)$$

должна быть равна 2,32 ГГц. Однако, цилиндрические стальные вставки для ограничения длины разряда, показанные на рис. 1, несколько уменьшают эффективную длину резонатора, что, как видно из (1), должно повышать резонансную частоту. В результате, экспериментально измеренное значение резонансной частоты резонатора без нагрузки и регулирующих элементов равно 2,43 ГГц. Номинальная частота магнетронного генератора СВЧ мощности составляет 2,375 ГГц.

В процессе настройки кварцевые стерженьки диаметром 8 мм пересекали всю внутреннюю полость резонатора и вставлялись в соответствующие отверстия на противоположной торцевой стенке резонатора, надежно фиксируясь в ней (рис. 2), что обеспечивало точность и воспроизводимость их ориентации.

Так как СВЧ энергия из возбуждающего волновода поступает с одной боковой стороны, то структура СВЧ поля в резонаторе оказалась не вполне симметричной по отношению к этому направлению. Поэтому для регулировки резонансной частоты с помощью погружения кварцевых стерженьков были выбраны отверстия №№ 1, 2, 5, 6, 7, 8, 9, 12 (рис. 1), в результате чего погружаемые стерженьки оказывались в области сравнительно высокой напряжённости электрического поля.

Вначале была экспериментально определена резонансная частота резонатора без ОКТ и регулирующих элементов. Как уже было сказано, она найдена равной 2,43 ГГц. Затем исследовали влияние на резонансную частоту введения в резонатор опорных кварцевых труб различных диаметров. Для трубы с внешним диаметром 20 мм резонансная частота составила 2,422 ГГц. Для трубы с внешним диаметром 24 мм – 2,410 ГГц. Для трубы с внешним диаметром 30 мм – 2,402 ГГц.

Была также проведена оценка и сравнение эффективности разных видов настройки для системы, состоящей из ОКТ диаметром 42 мм и кварцевого стержня диаметром 20 мм внутри ОКТ. Из-за большого объема кварцевого стекла, помещенного в резонатор, центральная частота резонанса такой системы была равна 2332 МГц, что значительно ниже частоты магнетрона - 2375 МГц, при значении КСВ равном 5. Пытаясь улучшить КСВ подстройкой кварцевыми стерженьками в позициях 2 и 3, получали резонанс при 2322 МГц, с КСВ, равным 1,2.

Затем была произведена серия измерений резонансной частоты резонатора с установленной в нём кварцевой трубой диаметром 20 мм при последовательном введении в него стерженьков в позиции №№ 1, 2, 6, 12, 7, 8,

9 (такой порядок был выбран из соображений удобства измерений). Набор соответствующих осциллограмм приведён на рис. 6 (масштаб по горизонтали увеличен).

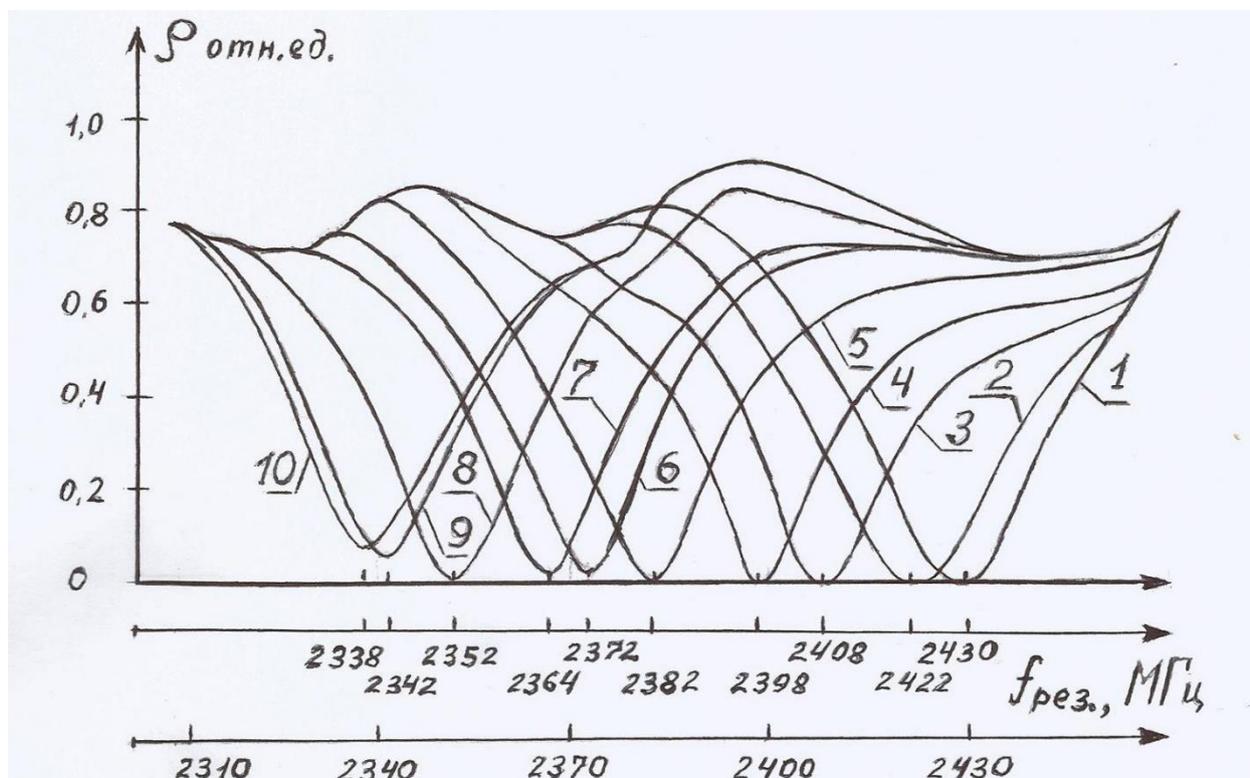


Рис. 6. Кривые частотной зависимости КСВ для системы резонатор – опорная кварцевая труба, для различных наборов регулирующих элементов  
 1 – резонатор без ОКТ и регулирующих стерженьков; 2 – резонатор с ОКТ без стерженьков; 3 – резонатор, ОКТ и стерженёк в позиции 1; 4 – резонатор, ОКТ и стерженьки в позициях 1 и 2; 5 – резонатор, ОКТ и стерженьки в позициях 1, 2, 6; 6 – резонатор, ОКТ и стерженьки в позициях 1, 2, 6, 12; 7 – резонатор, ОКТ и стерженьки в позициях 1, 2, 6, 12, 5; 8 – резонатор, ОКТ и стерженьки в позициях 1, 2, 6, 12, 5, 7; 9 – резонатор, ОКТ и стерженьки в позициях 1, 2, 6, 12, 5, 7, 8; 10 – резонатор, ОКТ и стерженьки в позициях 1, 2, 6, 12, 5, 7, 8, 9

Из рис. 6 видно, что резонансная частота системы монотонно уменьшается с увеличением количества введённых регулирующих стерженьков, и она становится равной ожидаемой частоте СВЧ-генератора уже после введения 4-х стерженьков – в позициях 1, 2, 6, 12. Введение дополнительно стерженьков в позиции 5, 7, 8, 9 создаёт запас регулировки, смещая резонансную частоту в

сторону уменьшения ещё на 35 МГц. Величины КСВ в минимумах приведённых кривых составляют от 1,2 до 1,4.

Резюмируя результаты по подстройке резонансных частот резонатора с ОКТ диаметром 20 мм, с помощью подстроечных кварцевых стерженьков диаметром 8 мм, можно отметить, что необходимый диапазон регулировки этим методом, при использовании имеющихся в наличии 8 подстроечных стерженьков, обеспечивается с запасом.

## 5. “Горячие” измерения на резонаторе типа $H_{111}$

Целью данного этапа работы является создание макета СВЧ плазмохимической установки для возбуждения плазмы резонансного локального СВЧ-разряда пониженного давления при помощи цилиндрического резонатора, работающего на виде колебаний  $H_{111}$ , получение в нём устойчивого резонансного локального СВЧ разряда на кислороде при давлении порядка 10 Тор и оптимизация характеристик разряда при помощи регулирующих кварцевых элементов, СВЧ мощности и давления рабочего газа (фактор  $E/p$ ).

На основе СВЧ-генератора “Фиалка” был создан макет СВЧ – плазмохимической установки с резонаторным СВЧ плазмотроном на виде колебаний  $H_{111}$ . Схема изображена на рис. 7.

Полная СВЧ мощность, поступающая в тракт, определяется по делениям лимба аттенюатора 3, соответствующим степени его открытия, в соответствии с его предварительной градуировкой.

СВЧ мощность, отражённая от системы: резонатор – плазма, определяется калориметрическим методом в нагрузке 5 ферритового циркулятора 4. Разность этих двух величин равна мощности, поглощаемой в системе: резонатор – плазма. Мы исследовали её зависимость от количества и положения регулирующих кварцевых стерженьков, вводимых в объём резонатора при наличии в ОКТ плазмы СВЧ – разряда, при различном давлении в этом разряде. Падающая мощность при всех измерениях была равна 510 Вт. Поджиг разряда производился при настройке резонатора на частоту магнетронного СВЧ – генератора (то есть, со стерженьками, введёнными в позиции 1, 2, 6, 12).

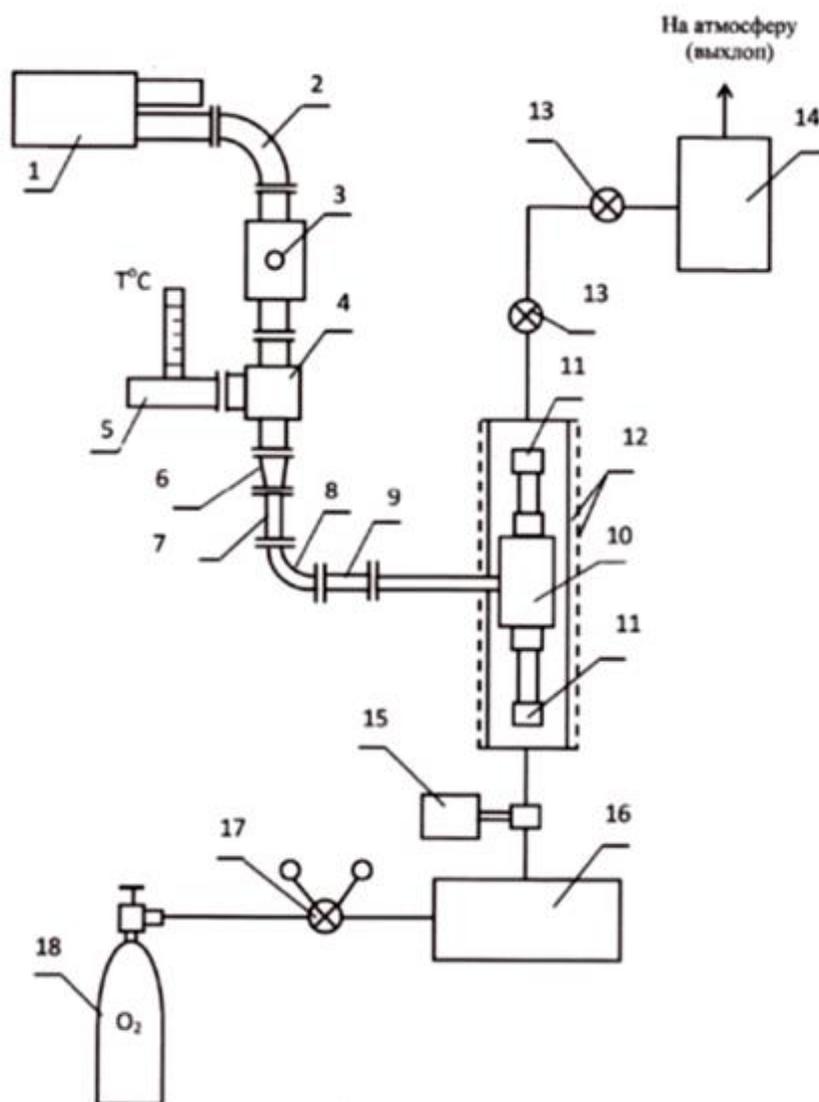


Рис. 7. Стенд для горячих измерений

1 – генератор СВЧ мощности с плечами I и II; 2 – волноводный поворот 90x45; 3 – водяной аттенюатор; 4 – ферритовый циркулятор; 5 – нагрузка - измеритель отражённой мощности; 6 - волноводный переход 90x45 на 72x34; 7 – прямой отрезок волновода 72x34; 8 – поворот 72x34; 9 – переход 72x34 на 72x20; 10 – резонатор с ОКТ; 11 – вакуумные переходы и держатели; 12 – корпус с сетчатыми ограждениями; 13 – вакуумные вентили; 14 – насос форвакуумный; 15 – вакуумметр; 16 – химблок (РРГ-10, осушка, фильтры, блок управления, гигрометр, манометр); 17 – регулятор давления с манометрами; 18 – баллон кислородный

На рис. 8 и рис. 9 представлены фотографии резонатора с горящим СВЧ-разрядом (на кислороде при давлении 10 Тор). На первой фотографии виден СВЧ разряд, горящий внутри ОКТ, а на второй – видна светящаяся, со стороны откачки, рекомбинационная область возбужденного газового потока.



Рис. 8. Фото входной части СВЧ-разряда



Рис. 9. Фото выходной части СВЧ-разряда

При добавлении в область разряда небольших концентраций химического реагента ( $\text{SiCl}_4$ ) эта светящаяся область укорачивается, а потом может исчезнуть при дальнейшем увеличении его концентрации, если падающая СВЧ мощность остаётся неизменной. Область плазмы длиной в несколько сантиметров находится внутри резонатора, между цилиндрическими ограничителями длины разряда.

Методика исследования резонансных характеристик осуществлялась следующим образом.

После поджига разряда измерялась отражённая от резонатора с плазмой СВЧ мощность, а затем последовательно вводились стерженьки в положения 5, 7, 8, 9, и при введении каждого из них также измерялась отражённая мощность. После этого стерженьки из положений 5, 7, 8, 9 одновременно извлекались, и измерения показывали, что отражённая СВЧ мощность в их отсутствие осталась неизменной. Затем последовательно извлекались стерженьки из позиций 12, 6, 2, 1, и при извлечении каждого из них измерялась отражённая мощность. Каждое измерение относилось к той резонансной частоте, которую имела система: резонатор – трубка при той же композиции регулирующих элементов, что и на холодных измерениях. По известному значению падающей мощности и измеренным значениям отражённой мощности определялись значения мощности, поглощённой в плазме СВЧ разряда.

Таким образом, мы измерили зависимость поглощённой плазмой СВЧ мощности от резонансной частоты для 7 точек, соответственно числу регулирующих стерженьков, для трёх значений давления: 1 Тор, 3 Тор и 6 Тор. Результаты измерений приведены на рис. 10.

Наблюдаемый вид кривых показывает, что резонансный режим работы СВЧ плазмотрона на виде колебаний  $H_{111}$  зависит не только от частоты и мощности СВЧ генератора, но и от давления рабочего газа, понижая, или повышая критическую связь генератора СВЧ с резонатором, нагруженным плазмой, что проявляется в некотором уменьшении, или увеличении пиковой поглощаемой мощности. Практически, резонансный режим работы СВЧ плазмотрона на виде колебаний  $H_{111}$  легко определяется по минимальному уровню отражённой от него СВЧ мощности в соответствующем плече циркулятора.

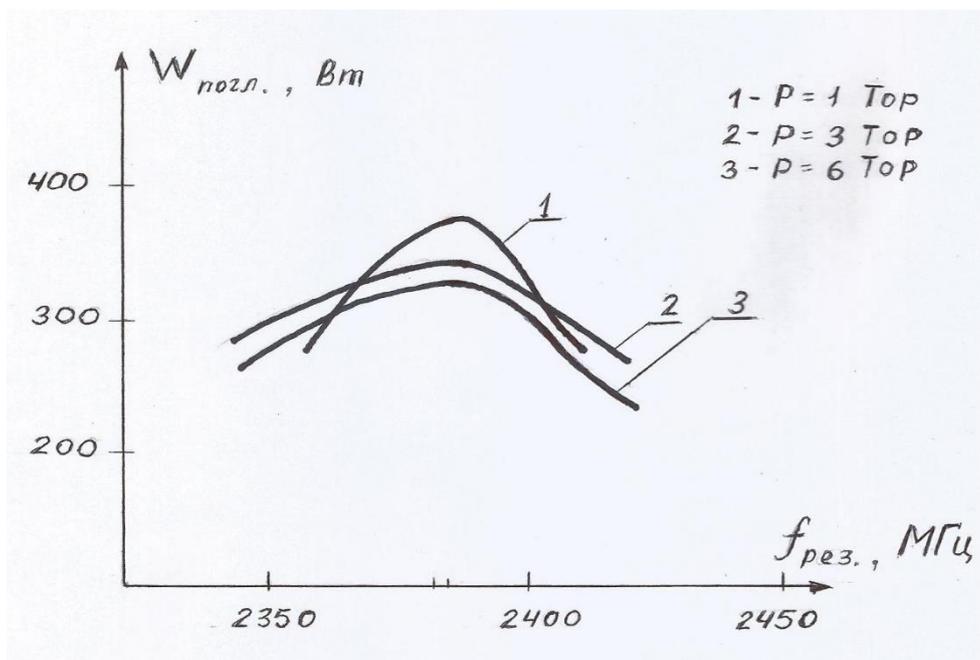


Рис. 10. Зависимость СВЧ мощности, поглощенной в плазме от резонансной частоты.

Абсциссы максимумов кривых: 1 – 2,385 ГГц, 2 – 2,382 ГГц, 3 – 2,382 ГГц

Все измерения производились в основном на кислородной плазме. Добавление паров хлорида кремния в газовую смесь в концентрации, необходимой для успешного ведения процесса осаждения слоёв кварцевого стекла на поверхность ОКТ, как и ожидалось, не должны были привести к сколько-нибудь существенному сдвигу резонансной частоты, вследствие относительно малой величины этой концентрации. Тем более не должны были существенно изменить резонансную частоту пары легирующих добавок, например, фтора, так как концентрация их в газовой смеси ещё меньше.

## 6. Заключение

Исследования показали, что резонаторный СВЧ плазмотрон с укороченной ёмкостью в середине на виде колебаний  $TE_{111}$  ( $H_{111}$ ) в режиме критической связи может эффективно обеспечивать создание неизотермической неравновесной плазмы резонансного локального СВЧ разряда пониженного давления при оптимальном соотношении  $E/P$  и наличии соответствующей

регулировки резонансной частоты резонатора с помощью разработанной методики и предлагаемых средств.

### Литература

1. Блинов Л.М., Гуляев Ю.В., Черепенин В.А., Герасименко А.П. “Резонансные неравновесные СВЧ плазмохимические системы в технологии синтеза специальных кварцевых волоконных световодов” //Журнал радиоэлектроники: Электронный журнал, 2014, № 12, URL: <http://jre.cplire.ru/jre/dec14/4/text.pdf>
2. Блинов Л.М., Герасименко А.П., Гуляев Ю.В., Долгов А.П., Кочмарев Л. Ю., Шилов И. П. “Высокоапертурные оптические структуры волноводов на основе кварцевого стекла, легированного фтором, формируемые в неизотермической плазме резонансного локального СВЧ-разряда пониженного давления ” // Журнал радиоэлектроники, 2016, №1, URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jan16/18/text.pdf>

Ссылка на статью:

Исследование резонансных характеристик СВЧ плазмотрона на волне  $TE_{11}$  ( $H_{11}$ ) для плазмохимического осаждения на кварцевые стержни (трубы, заготовки) оптических структур специальных волоконных световодов на основе кварцевого стекла, легированного фтором и азотом, в неизотермической плазме резонансного локального СВЧ-разряда пониженного давления. Л.М.Блинов, А.П.Герасименко, А.П.Долгов, Л.Ю.Кочмарев, В.А.Черепенин, И П Шилов. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал], 2017, №1, Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jan17/4/text.pdf>