

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

Физический факультет

Кафедра общей физики

Волков Игорь Алексеевич
КУРСОВАЯ РАБОТА

**Влияние параметров импульсно-периодического режима СВЧ
генератора на стабильность плазмы**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №19306

Научный руководитель:
А.Э. Медведев

Оценка научного руководителя

«26» _____ декабря 2020 г.

Преподаватель практикума:
к.ф.-м.н. В. Б. Рева
Оценка преподавателя практикума

«26» _____ декабря 2020 г.

Куратор практикума:
к.т.н. В.Т. Астрелин

Итоговая оценка

«26» _____ декабря 2020 г.

Аннотация

В этой работе были исследованы особенности работы СВЧ генератора для получения стабильной плазмы. На самом деле, стабильность плазмы связана с балансом подводимой энергии и её потерями в результате: рекомбинации заряженных частиц, конвективного выноса (поскольку плазма в потоке газа), на излучение и др. Поэтому предполагается изучать свойства самой плазмы, в зависимости от, например, длины импульсов СВЧ генератора. Очевидно, имеет также значение амплитуда импульсов, или их мощность.

Работа выполнена в лаборатории института лазерной физики СО РАН.

Оглавление

Цель работы	5
Теоретическая часть	5
Экспериментальная установка	9
Экспериментальные результаты	14
Заключение.....	19

Глава 1. Цель работы

В настоящее время плазменные источники активно применяются в технологиях поверхностной обработки. Используется как газоразрядная, так и лазерная плазма. Для ускорения ионов при дальнейшем внедрении в материал применяют электрическую энергию различных частотных диапазонов. Однако, традиционно в рабочих установках используют достаточно низкие давления порядка нескольких или даже долей Паскаль, и лишь в последнее время - порядка сотни Торр. И было бы неплохо применять источник плазмы атмосферного давления. Высокое давление позволяло бы создавать на много большую плотность ионного тока при его однородности, что коренным образом бы изменило данный аспект в отношении производительности. Использование без необходимости в специальной вакуумной технике значительно уменьшило бы затраты на реализацию данной технологии и позволило обрабатывать существенно большие объемы материала. Обеспечить высокую производительность также позволяет метод комбинирования двух источников для получения плазмы СО₂ лазера и СВЧ генератора. Однако мы будем исследовать лишь один аспект данной работы, а именно работу с СВЧ генератором и получение стабильной плазмы в данном режиме. И наша цель непосредственно изучить режимы СВЧ генератора и стабильность получаемой плазмы. Возможно, для дальнейшего применения полученных знаний и опыта.

Глава 2. Теоретическая часть

В нашем эксперименте в специальной установке происходит газовый разряд, электрический пробой, в результате которого под влиянием внешнего электромагнитного поля создается устойчивая плазма. В данном случае источником электромагнитного поля служит СВЧ генератор. Пробой сопровождается как правило видимой невооружённым глазом вспышкой.

Первичным эффектом пробоя является электронная лавина, которая развивается под действием внешнего поля. Лавина начинает с малого количества затравочных электронов, которые появляются случайно, далее под действием поля электрон набирает энергию, разгоняясь в нем, достигая потенциала ионизации он ионизирует молекулу теряя собственную энергию. В результате появляются два медленных электрона, которые в дальнейшем тоже ускоряются и т. д. Понятно, что при определенных полях данная лавина развиваться просто не сможет из-за граничных условий на энергию

электрона и препятствующих процессов. Лавину могут тормозить потери электронов, потери энергии электронов. Электроны теряют энергию на возбуждение электронных состояний, молекулярных колебаний, при упругих столкновениях. Электроны также просто могут вылетать из области действия поля. Очень сильно эти факторы влияют в момент рождения волны ионизации, на дальнейшее ее развитие, на поздней стадии ионизации же по большей части в процесс вступает рекомбинация, которая ограничивает возможности большей ионизации.

Для СВЧ диапазона характерна малость амплитуды колебаний электрона по сравнению с размерами разрядного объема. По этой причине электроны и ионы в своем движении под действием поля не касаются стенок, поле не толкает энергичные частицы к стенкам, эмиссионные процессы роли не играют. Электронные лавины локализованы, то есть в каждом месте развиваются независимо. При экспериментальном определении пороговых значений полей СВЧ мощность подводят через волновод в резонатор, на пути стоит делитель мощности, который позволяет отводить ее часть в сторону. Скорость диффузионных потерь определяется диффузионной длиной λ , она вычисляется по формуле (где R и L – это характерные размеры цилиндрического резонатора):

$$\left(\frac{1}{\lambda}\right)^2 = \left(\frac{2,4^2}{R}\right)\left(\frac{\pi}{L}\right)^2$$

Размеры резонатора всегда связаны с длиной его волны и сравнимы с ней, поэтому на всякий случай, геометрия позволяет менять его размеры, как и в нашей установке. Электрическое поле в цилиндрическом резонаторе направлено по образующей. Напряженность E максимальна на оси и падает к поверхности пропорционально функции Бесселя $I_0 \frac{2,4r}{R}$. Диффузионную длину можно менять изменяя глубину цилиндра. Пробой наступает раньше всего в центре резонатора.

Плотность электронов как функция координат и времени подчиняется уравнению диффузии с объемными источниками:

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} = D\Delta n_e + (v_i - v_a)n_e$$

n_e - концентрация, D - коэффициент диффузии, v_i – частота ионизации, v_a - частота прилипания. Эти частоты зависят от энергетического спектра электронов, который определяется значением поля. Зависимостью коэффициента диффузии от поля можно пренебречь по сравнению с $v_i(E)$ и $v_a(E)$, зависимость этой величины слабее.

Если считать поле однородным в среде, то усредняя по объему получаем уравнение для средней плотности или что то же самое для полного числа электронов в разрядном объеме:

$$\frac{\partial N_e}{\partial t} = (v_i - v_a - v_d)N_e, \quad v_d = \frac{D}{\lambda^2}$$

При допущении что время включения внешнего поля меньше, чем развития волны предыдущее уравнение имеет следующее решение (импульсные поля):

$$N_e = N_{e0} e^{\frac{t}{\theta}}$$

$$\theta = \frac{1}{v_i - v_a - v_d} - \text{постоянная времени лавины.}$$

Если $(v_i - v_a - v_d) > 0$, то лавина развивается, следовательно стационарный критерий пробоя:

$$v_i(E_t) = v_d + v_a(E_t)$$

При определенном значении поля E_t – происходит пробой.

Частота ионизации $v_a \sim E^2$, в отсутствие потерь энергии электронов, в присутствии потерь, зависимость частоты от поля E гораздо более резкая, то есть частота ионизации даже при небольшом изменении поля процентов в 10, может увеличиться в 2 раза, что гарантирует надёжный пробой.

При высоких давлениях, когда диффузионные потери незначительны, на первый план выступают потери энергии, связанные с упругими столкновениями. Электрон не может приобрести в данном случае энергию больше:

$$\varepsilon = \frac{M}{2m} \frac{E^2 e^2}{m v_m^2} \sim E/p^2$$

Так как средняя приобретенная энергия:

$$\frac{e^2 E^2}{m(\omega^2 + v_m^2)} = \Delta \varepsilon_E v_m$$

И установившаяся энергия:

$$\frac{e^2 E^2}{m(\omega^2 + v_m^2)} = \Delta \varepsilon_E / \delta$$

При высоких давлениях $\omega^2 \ll v_m^2$

Если эта энергия меньше $E_{\text{газ}}^*$ - ионизации газа, то электрон не будет возбуждать атомы. Следовательно пороговое поле:

$$E_t = \frac{mv_m}{e} \sqrt{\frac{2E_{\text{газ}}^*}{M}} \sim p$$

Эффективная частота столкновений $v_m = v_c(1 - \overline{\cos\theta})$

v_c – обычная частота упругих столкновений, возьмем опытное значение (для аргона):

$$v_c = 5.93 \cdot 10^7 \sqrt{E_{Ar}^* p P_c} \text{ c}^{-1}$$

p – давление, P_c – вероятность столкновений при нормальных условиях, P_c определяется через сечение столкновений:

$$P_c = 9.66 \cdot 10^{18} \frac{\sigma}{T[\text{K}]} \text{ см}^{-1} \cdot \text{торр}^{-1}$$

тогда:

$$E_t = \frac{3,24 \cdot 10^{17} \cdot m E_{Ar}^* p \sigma}{e T \sqrt{M}}$$

Подставляя значения следующие значения:

$$T = 300 \text{ К}, \sigma = 4,02 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2, E_{Ar}^* = 15,76 \text{ эВ}, e = 1,61 \cdot 10^{-19} \text{ Кл},$$

$$m = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг}, M = 6,632 \cdot 10^{-27} \text{ кг}, p = 760 \text{ торр}$$

$$E_t = 2,89 \cdot 10^5 \frac{\text{В}}{\text{м}}$$

В нашем случае, проблема стабильности плазмы связана с импульсным режимом. От длительности импульса зависит установившаяся мода колебаний в самом магнетроне. Время «включения» магнетрона 100-200 нс, если длительность импульса питания сравнима, то эффект будет заметен. Потом, рекомбинационные потери, зависящие от плотности плазмы, на разных фазах существования плазмы также сравнимы с длительностью импульса питания. Экспериментально это можно увидеть исследуя пороги от длительности импульса.

Тип колебаний в резонаторе – TE_{012}

Глава 3. Экспериментальная установка

СВЧ установка мощностью 1 кВт

Установка включает в себя генератор, магнетрон, СВЧ тракт, технологическую головку с цилиндрическим резонатором. СВЧ генератор состоит из блока магнетрона, источника питания и генератора запуска. На рис. 1 приведена условная электрическая схема СВЧ установки.

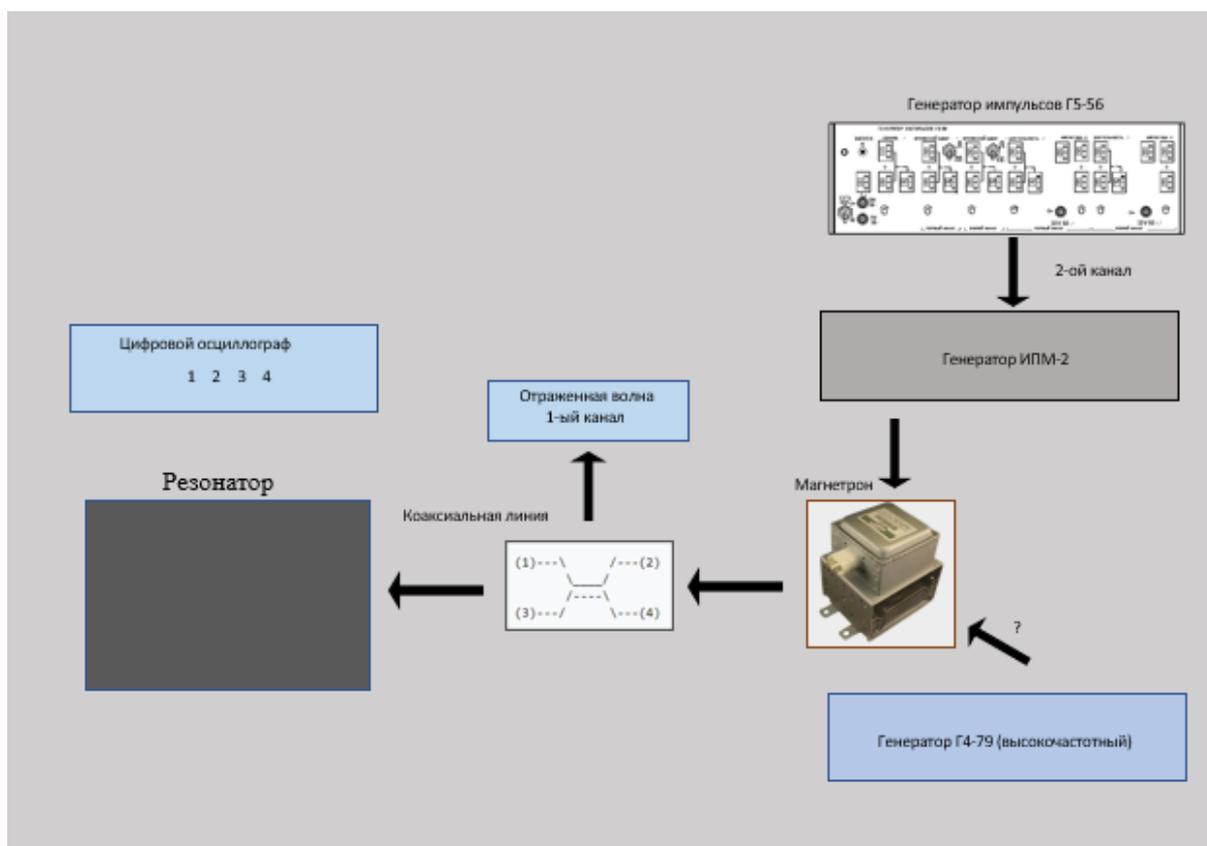


Рис. 1 Схема установки

Питание анода магнетрона осуществляется от импульсного источника, имеющего возможность работать в режимах обратной связи по току, напряжению анода и току накала. При наших первых включениях работали с малой скважностью, порядка трёх. Магнетрон быстро нагревался так, что мог работать без тока накала (при выключенном токе накала), поэтому выходил за пределы регулировки и система шла в разнос. Регулировки генератора запуска позволяют выбрать величину задержки от 100 нс до 10 мкс и длительность импульса от 0,5 до 100 мкс. Штырь возбуждает колебания в прямоугольном волноводе, откуда через коаксиально-волноводный переход СВЧ импульсы поступают на вход 1 циркулятора. С входа 2 циркулятора,

через петлю связи, осуществляется ввод СВЧ энергии в резонатор технологической головки. Направленный ответвитель на коаксиальной линии передает отраженный сигнал на 3-ий вход осциллографа и предотвращает возникновение стоячей волны. Также на СВЧ тракте находится аттенюатор на 40 дБ. Для отвода от поглощающей нагрузки тепла используется водяное охлаждение. Поле в резонаторе с помощью петли связи, регистрируется через вход (4) осциллографа.

Режим согласования с подающей СВЧ мощностью доступен при помощи изменения погружения в цилиндрический резонатор штыря (штыревого ввода). Согласованность с петлевым вводом достигается при помощи поворота вектора петли в пространстве резонатора. (в установке имеются два типа ввода)

Резонатор представлен главным образом цилиндрической полостью с регулировкой глубины этого цилиндра, вращающейся нижней частью, и двумя вводами СВЧ мощности (петлевой и штыревой вводы). Также на резонаторе расположены окошки для наблюдения за поведением плазмы, отверстие для манометра и четыре специальных отверстия для подачи газа, расположенных по касательной к цилиндрической плоскости для равномерности плазменного потока. На конце резонатора находится специальное сопло из молибдена. Газ подается через коллекторы, оснащенные специальными измерителями расхода газа, трубопровод закрывают краны.

Ниже представлена полная схема данной установки, предоставленная работниками лаборатории:

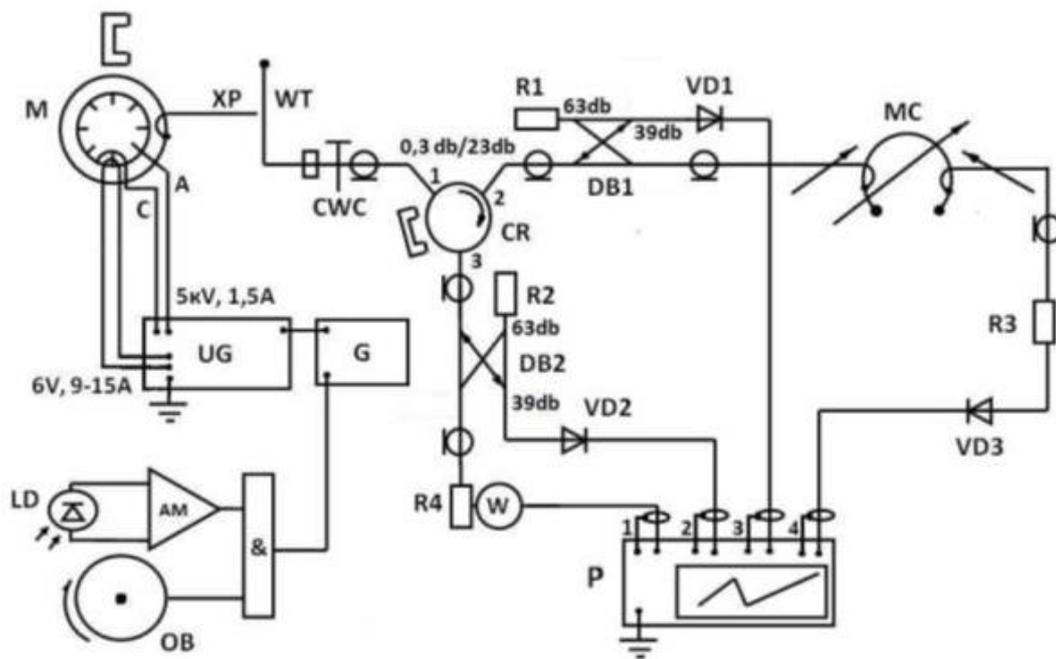


Рис. 2 Подробная схема установки

1. анода магнетрона (M)
2. импульсный источник (UG)
3. генератор (G)
4. фотодиод (LD) (не используется)
5. штырь магнетрона (XP)
6. прямоугольный волновод (WT)
7. коаксиально-волноводный переход (CWC)
8. 1 циркулятор (CR)
9. резонатор технологической головки (MC)
10. согласованная нагрузка (R4).
11. калориметрический измеритель мощности (W)
12. направленные ответвители (DB1) и (DB2)
13. детекторные головки (VD1) и (VD2)
14. осциллограф (P).
15. аттенюатор (R3)
16. детектор (VD3)

Питание анода магнетрона (М) осуществляется от импульсного источника (UG), имеющего возможность работать в режимах обратной связи по току, напряжению анода и току накала, что позволяет эффективно стабилизировать и управлять величиной мощности в различных рабочих точках магнетронной лампы. Импульсы запуска анодного напряжения формируются генератором (G). Регулировки генератора запуска позволяют выбрать величину задержки от 100 нс до 10 мкс и длительность импульса от 0,5 до 100 мкс. В результате на штыре магнетрона (XP) получаем СВЧ сигнал с регулируемой амплитудой. Штырь возбуждает колебания в прямоугольном волноводе (WT), откуда через коаксиально-волноводный переход (CWC) СВЧ импульсы поступают на вход 1 циркулятора (CR). С входа 2 циркулятора, через петлю связи, осуществляется ввод СВЧ энергии в резонатор технологической головки (МС). Отражённая от резонатора волна попадает на вход 3 и поглощается в согласованной нагрузке (R4). Для отвода от поглощающей нагрузки тепла используется водяное охлаждение, на основе которого выполнен калориметрический измеритель мощности (W). Через направленные ответвители (DB1) и (DB2) прямой и отражённый сигналы, ослабляясь на 40 Дб, направляется на детекторные головки (VD1) и (VD2), после чего поступает для регистрации на входы (2) и (3) осциллографа (P). Поле в резонаторе с помощью петли связи, аттенюатора (R3) и детектора (VD3) регистрируется через вход (4) осциллографа.

В ходе работы мы сделали штыревой ввод на данной установке, подключили систему подачи газа к резонатору, экспериментально рассчитали оптимальную глубину погружения штыревого ввода в резонатор, для его оптимальной синхронизации.

Система жидкостного отвода тепла

Отвод тепла будет осуществляться жидкостью, протекающей через трубку, приваренную витками к внешней площади цилиндрического резонатора, на концах трубы устанавливается необходимая разность давлений, для достижения необходимой установившейся температуры резонатора.

Отводимая мощность рассчитывается по формуле:

$$N = \alpha \cdot \Delta T \cdot S$$

Однако мощность, отводимая жидкостью, не может считаться обычным образом, так как присутствует конвекционный эффект, то есть снимается дополнительное тепло с поверхности вследствие движения жидкости.

Вследствие этого коэффициент α считается по специальной формуле:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{l}$$

Где Nu - критерий Нуссельта. Однако существует приближенная формула для вычисления этого коэффициента при взаимодействии с металлом.

$$\alpha = 350 + 2100\sqrt{v} \text{ (усл. ед.)}$$

Соответствующая скорость жидкости в трубке рассчитывается исходя из закона Пуазёйля:

$$v = \frac{\pi \cdot \Delta P \cdot R^4}{8 \cdot \eta \cdot L \cdot \pi R^2}$$

Соответственно если подставит в эти выражения наши параметры цепи:

$$\Delta P = 1 \text{ а. т. м}$$

$$T = 27,3 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$L = 1 \text{ м}$$

$$R = 2 \text{ мм}$$

$$S = 0,009 \text{ м}^2$$

$$T_{\text{поверхности}} = 50^\circ\text{C}$$

Это приемлемая величина для нашей установки.

Глава 3. Экспериментальные результаты

Решение в виде квазицилиндрического резонатора позволяет, кроме СВЧ, обеспечить ввод лазерного пучка через запердельный волновод. Квазицилиндрическая форма резонатора позволяет перераспределить электрическое поле ТМ₀₁₂-моды образуя максимум у выходного отверстия сопла.

Расчет электрического поля в резонаторе 2,46 ГГц, P = 3 кВт:

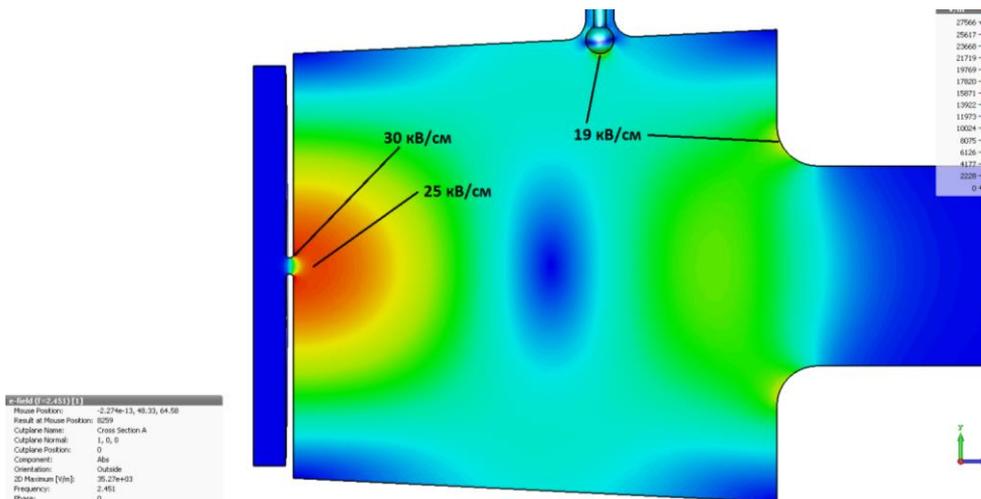


Рис. 3 Расчет электрического поля в резонаторе

Так как это резонатор, волны электрического поля многократно отражаются от стенок, что позволяет добиться большей амплитуды. Как уже говорилось ранее с помощью изменения местоположения штыревого ввода и размеров резонатора можно создать стоячую волну.

Положение резонанса определяется по графикам прямой и отражённой волн в коаксиальном кабеле. При наступлении резонанса резонатор начинает потреблять больше энергии, и отраженная волна уменьшается.

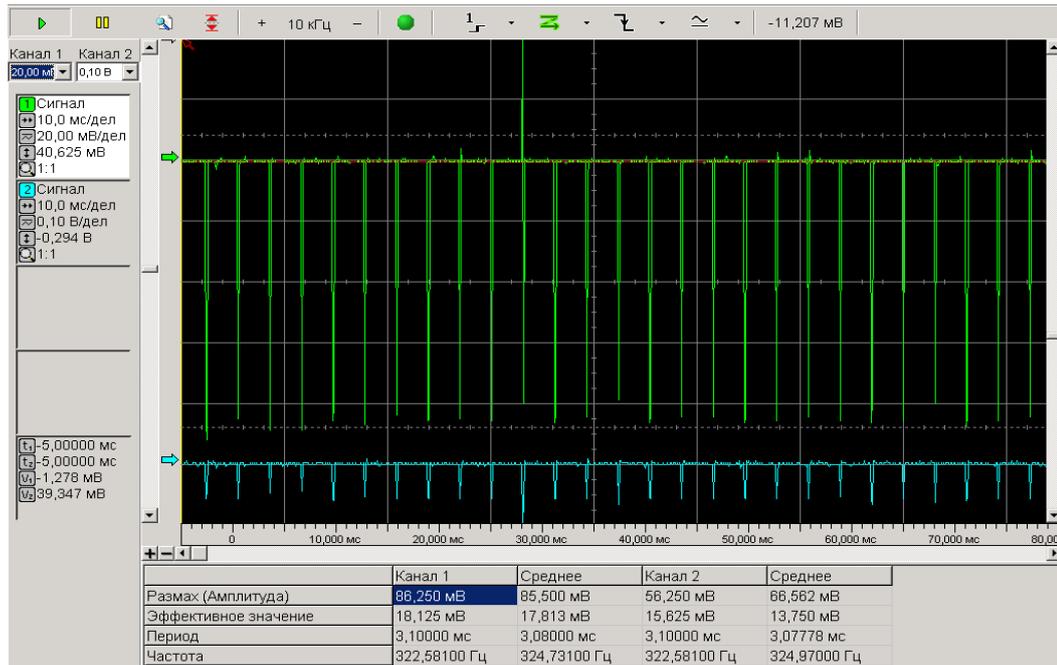


Рис. 4 Осциллограмма импульсов отражённой (зелёный цвет) и прямой (голубой цвет) волн для ненастроенного резонатора

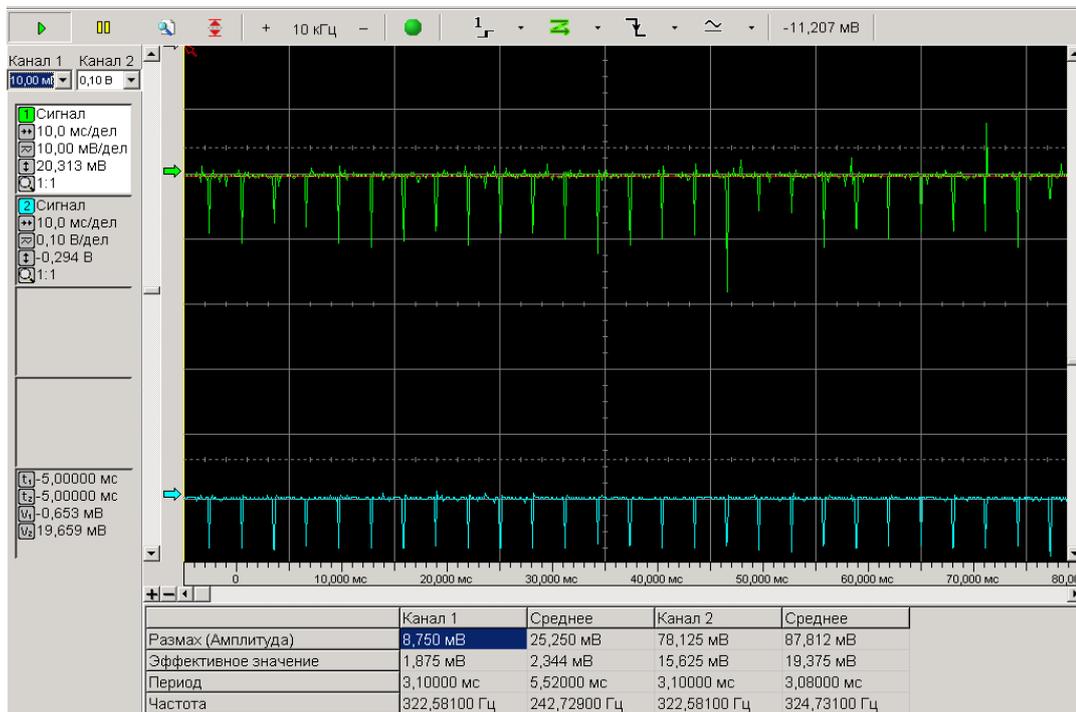


Рис. 5 Осциллограмма импульсов отражённой (зелёный цвет) и прямой (голубой цвет) волн для настроенного резонатора

Период $3 \cdot 10^{-3}$, импульс 100 мкс, ток 28 мА, 4.7 кВ

Добротность резонатора – отношение запасенной энергии к теряемой за период.

$$Q = \omega_0 \frac{W_{\text{рез}}}{P}$$

При возникновении плазмы добротность резонатора понижается и потребность в поддержании порогового поля исчезает, ширина контура добротности увеличивается и потребность в точной настройке резонатора на резонанс отпадает. В этом случае, поддержание плазмы определяется балансом между поглощённой плазмой (подводимой к плазме) СВЧ мощности и мощностью потерь.

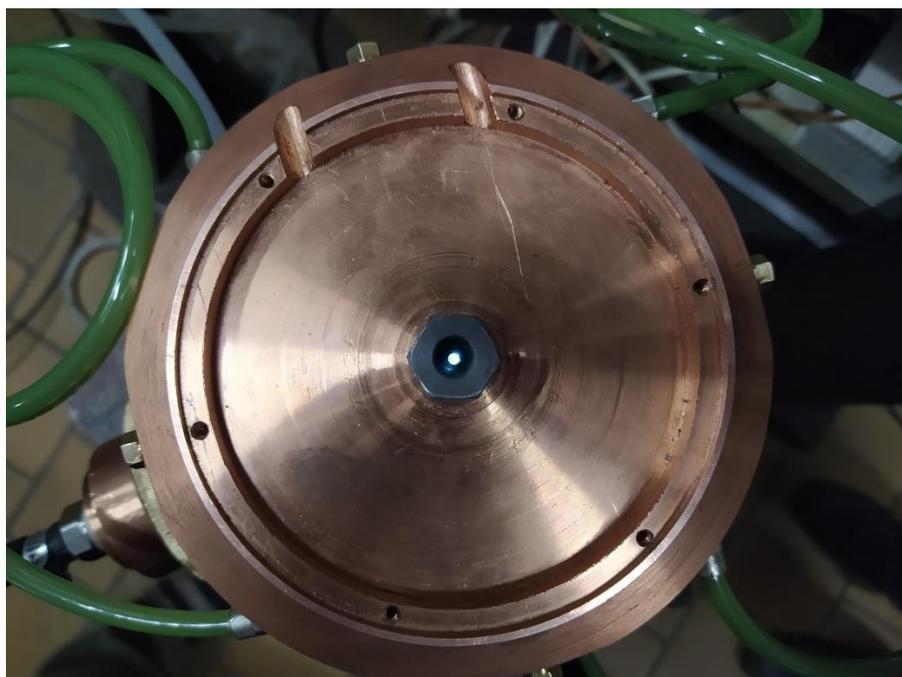


Рис. 5 Вид сверху резонатора

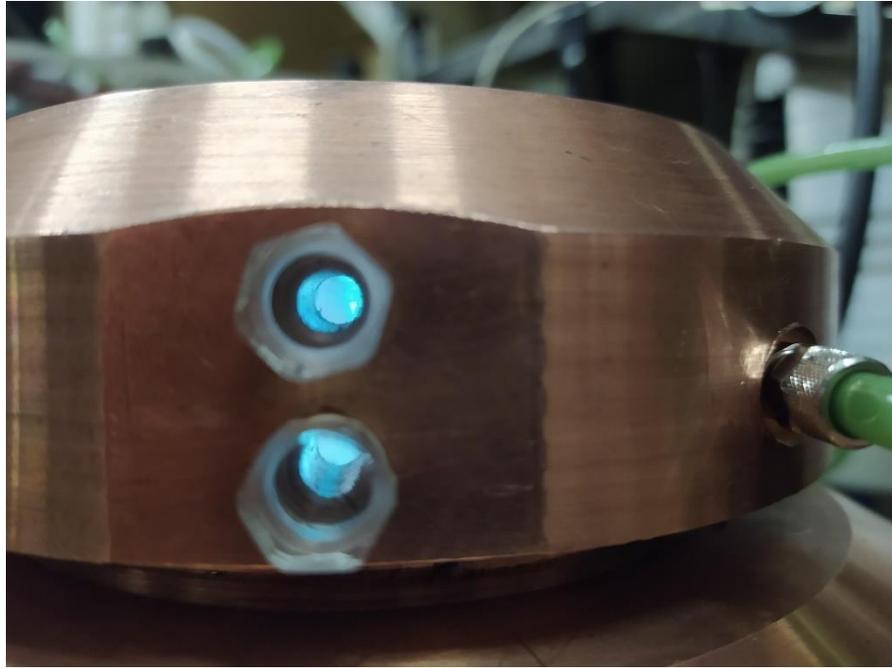


Рис. 6 Вид сбоку резонатора

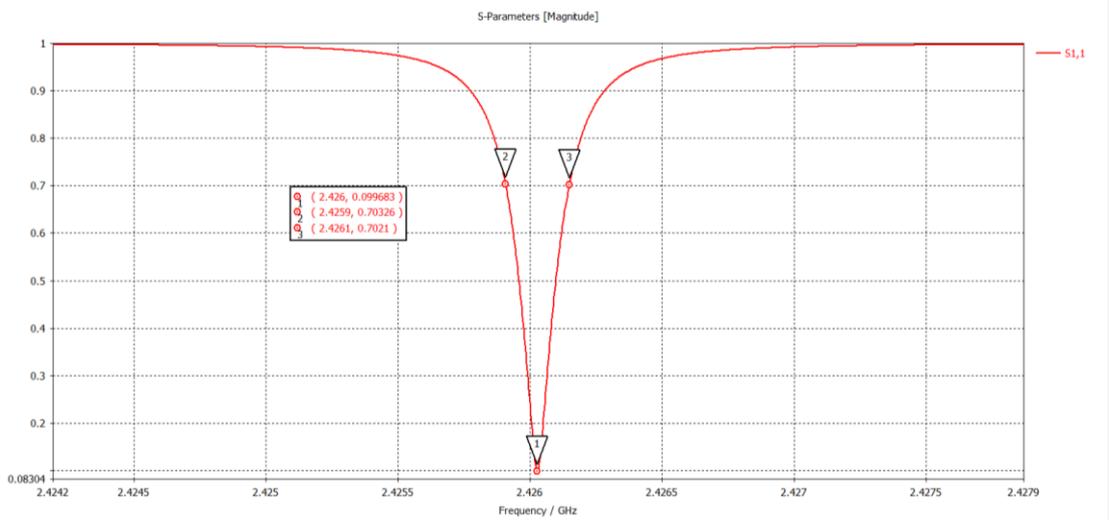


Рис. 7 Рассчитанный контур добротности резонатора

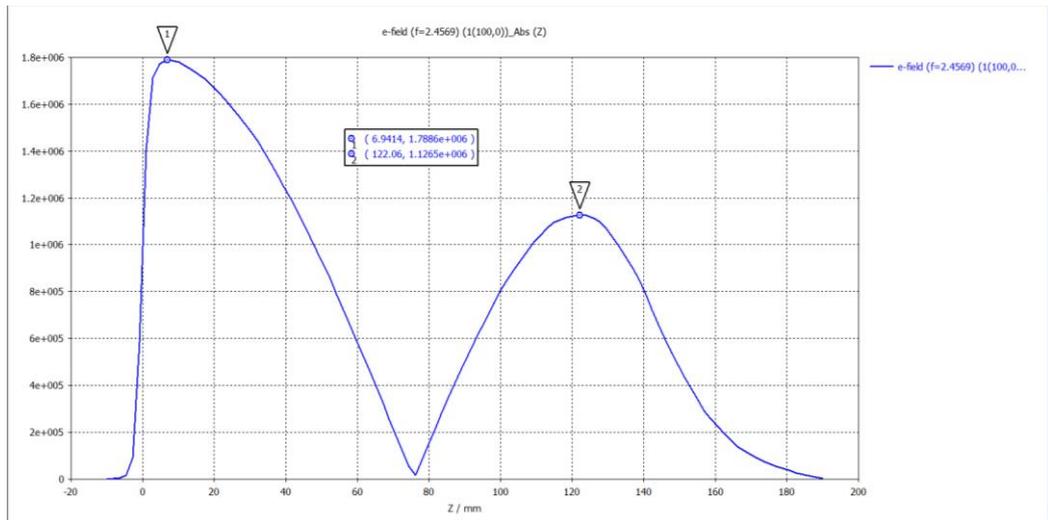


Рис. 8 График распределения поля вдоль оси пустого (без плазмы) резонатора при собственной частоте (мощность – 3 кВт)

Для измерения мощности СВЧ волны, подаваемой на резонатор, использовались две термисторные головки, находящиеся на местах детекторных головок VD1 и VD2. Разность данных мощностей – мощность, поглощаемая резонатором.

$$\frac{P_i}{P_{cp}} = \frac{T}{\tau} = k$$

P_i – мощность самого импульса, τ – длительность импульса, T – период повторения импульсов. k – скважность.

Найдем минимальную среднюю мощность, которую нужно подавать для зажигания плазмы при определённом уровне скважности ($p = 760$ торр)

$$E_t = 2,89 \cdot 10^5 \frac{\text{В}}{\text{м}}, \quad E = 2,54 \cdot 10^6 \sqrt{\frac{P_i}{3000} \frac{\text{В}}{\text{м}}} = E_t$$

$$P_i = k \cdot P_{cp} = \left(\frac{2,89 \cdot 10^5}{2,54 \cdot 10^6} \right)^2 \cdot 3000 \text{ Вт}, \quad P_{cp_{min}} = \frac{388,2}{k} \text{ Вт}$$

№	Период повторения импульсов t , мс	Скважность k	$P_{ср}$, Вт (пороги зажигания плазмы)	P_i , Вт	$P_{ср}$ теоретическое, Вт
1	3	10	46,0	460	38,8
2		15	28,0	420	25,9
3		30	22,0	660	12,9
4	30	10	45,0	450	38,8
5		15	27,0	405	25,9
6		30	21,0	630	12,9
№	Период повторения импульсов t , мс	Скважность k	$P_{ср}$, Вт (пороги зажигания плазмы)	E , $10^5 \cdot \text{В/м}$ ($E_t = 2,89 \cdot 10^5 \text{ В/м}$)	Длительность импульса t , мс
1	3	10	46,0	11,3	0,3
2		15	28,0	10,8	0,2
3		30	22,0	13,5	0,1
4	30	10	45,0	11,2	3,0
5		15	27,0	10,6	2,0
6		30	21,0	13,2	1,0

Соответственно при увеличении скважности минимальная средняя мощность будет уменьшаться. От длительности импульса как мы видим из эксперимента поле в пустом резонаторе почти не зависит, то есть длительность импульсов почти не влияет на стабильность плазмы (из полученных нами результатов).

Теоретические расчеты отличаются от экспериментальных данных. Это объясняется большой добротностью резонатора, малой точностью настройки резонатора. Вследствие этого установка не была в состоянии полного резонанса, из-за чего подавались значительно большие мощности. То есть вход должен выдерживать большие значения подаваемой мощности.

Глава 5. Заключение

В ходе работы мы собрали резонатор, осуществили туда подачу газа, собрали штыревой ввод, рассчитали параметры для охлаждающей системы. В итоге была инициирована плазма в аргоне при импульсно периодическом режиме работы СВЧ – генератора. Были найдены параметры для инициации. В результате измерений выяснилось, что резонатор имеет очень низкую точность настройки из-за высокой добротности пустого резонатора, как видно из расчётной кривой, с полушириной контура добротности порядка 200 кГц добротностью при данных параметрах в 11000, шаг резьбы физически невозможно сделать достаточно мелким, чтобы обеспечить плавную настройку пустого резонатора. Также резонатор имеет недостаточной мощности разъем и джампер (подводящий кабель) для поддержания горения плазмы, но это было хорошо известно изначально. Делался таким он из-за конструктивных особенностей настраиваемого ввода (с переменной длиной штыря), настраиваемый ввод с разъемом необходимой мощности выполнить технически крайне затруднительно из-за больших габаритов разъёма. Настраиваемый ввод с разъемом небольшой мощности (400 Вт) делался как пробный, чтобы экспериментально определиться с длиной штыря, необходимого для экспериментального согласования резонатора с СВЧ трактом. В качестве продолжения работы, можно улучшить точность настройки резонатора, заменить разъем и добиться выхода плазмы из сопла.

Как было видно из экспериментов, большая точность настройки не нужна, достаточно «поймать» положение вблизи резонанса, и плазма в аргоне с лёгкостью инициируется.

Список литературы

1. Ю.П. Райзер. Физика газового разряда, издание второе переработанное и дополненное. Москва: 1992. – 536. с.
2. Т. И. Изюмова, В. Т. Свиридов. Волноводы, коаксиальные и полосковые линии. Москва: Энергия, 1975. - 112. с.