

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

Физический факультет

Кафедра общей физики

Литвинов Иван Александрович

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Инициация аргоновой плазмы при импульсно-
периодическом режиме работы СВЧ генератора**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №19362

Научный руководитель:

___ А.Э. Медведев _____

Оценка научного руководителя

«_____» _____ 20__ г.

Преподаватель практикума

___ А. В. Судников _____

Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ 20__ г.

Куратор практикума:

___ к.т.н. В.Т. Астрелин _____

Итоговая оценка

«_____» _____ 20__ г.

Новосибирск 2020

Аннотация

Целью работы являлось инициация плазмы при импульсно-периодическом режиме работы СВЧ генератора в атмосфере аргона при давлении, сравнимом с атмосферным, а также нахождение параметров для инициации плазмы. Для этой цели была собрана установка, состоящая из квазицилиндрического резонатора, системы подвода СВЧ-излучения от магнетрона, работающего от генератора в импульсно-периодическом режиме работы и системы подачи аргона в резонатор. Также из теоретических соображений выведены нужные условия для инициации плазмы, и произведена настройка установки. На основании полученных параметров была иницирована плазма. Результаты хорошо согласуются с известными техническими данными. Предложена методика создания плазмы при атмосферном давлении. Данный способ инициации плазмы предполагается использовать для синтеза материалов на поверхности металлов различных веществ при помощи лазерной и СВЧ плазмы

Ключевые слова: квазицилиндрический резонатор, плазма, СВЧ-излучение.

Оглавление

1. Введение	4
2. Газовый разряд в СВЧ поле.....	5
2.1. Суть явления.....	5
2.2. Уравнение кинетики ионизации.	6
2.3. Стационарный критерий пробоя	7
3. Описание Экспериментальной установки	9
3.1. Квазицилиндрический резонатор.....	10
3.2. Методика измерений подаваемой на резонатор мощности, поля в области инициации плазмы и давления внутри резонатора.	16
4. Результаты и обработка измерений.	17
5. Выводы.	18
6. Благодарности.	18
7. Список литературы.	18

1. Введение

Инициация плазмы – сложный химико-физический процесс возникающий в различных газах и их смесях при энергетическом воздействии, увеличивающим энергию внешних электронов с дальнейшим их отрывом. В результате возникает газовый разряд. Существует несколько видов разрядов: тлеющий, искровой, дуговой, коронный и оптический. Возникают они из-за воздействия на газ электромагнитным полем – постоянным, переменным на частотах от кГц до ГГц (СВЧ) и частотах оптического диапазона при помощи лазеров.

На данный момент в лаборатории мощных лазеров Института Лазерной физики СО РАН ведутся исследования в области синтеза на поверхности металлов различных веществ при помощи лазерной и СВЧ плазмы. В настоящее время такой синтез чаще всего ведётся в установках с рабочим давлением не более 100 Тор. Особенностью лаборатории мощных газовых лазеров ИЛФ является разработка технологий для проведения синтеза при атмосферном давлении с возможностью комбинирования двух источников для получения плазмы: излучения CO₂-лазера и ЭМ-волны СВЧ генератора. При большом давлении скорость плазмо-химических процессов будет существенно выше. Синтез при атмосферном давлении также позволяет значительно снизить удельную стоимость обработки, так как это не требует оборудования для создания малых давлений и его обслуживания, кроме того, даёт возможность обрабатывать большие поверхности, не ограничивая размер деталей объёмом разрядной камеры.

Для данного синтеза в ИЛФ разработана установка, позволяющая создавать плазму при атмосферном давлении, и в которой имеется возможность согласованное использование лазерной и СВЧ плазмы. В данной курсовой работе исследуется инициация в таком устройстве газоразрядной плазмы в аргоне, возникающей за счет работы в импульсно-

периодическом режиме СВЧ генератора. Именно импульсно-периодический режим позволяет согласовано использовать СВЧ и лазер для инициации плазмы. Главной частью устройства является квазицилиндрический резонатор, именно он позволяет одновременно использовать лазер и СВЧ генератор. Его форма позволяет сместить плотность энергии поля к месту синтеза плазмы, тем самым допуская инициацию плазмы без пробоев в других местах при атмосферном давлении. Для среды внутри резонатора был использован газ аргон из-за его достаточно низкого потенциала ионизации по сравнению с остальными газами, лёгкости и относительно маленькой цене.

2. Газовый разряд в СВЧ поле.

2.1. Суть явления.

В данном эксперименте происходит инициация газоразрядной плазмы, возникающей и поддерживаемой за счёт протекания электрических токов в газах под влиянием внешнего электромагнитного поля, в нашем случае – СВЧ поля. Сам процесс протекания тока называется газовым разрядом.

Показателем образования плазмы служит пробой в газе, то есть резкое возрастание тока в непроводящем веществе, и превращение его в проводник. Происходит это из-за ионизации газа. Главной частью данного процесса является образование электронной лавины под действием электромагнитного поля. Она начинается с нескольких затравочных электронов, появляющихся либо в результате космического излучения, либо с помощью специального устройства для их создания, например, радиоактивный источник. Дальше эти электроны набирают энергию под действием поля. Достигая энергии, превышающей потенциал ионизации газа, он при столкновении с молекулой ионизирует её, в результате чего появляется 2 медленных электрона. Они также ускоряются, порождая ещё 4 и т. д. При СВЧ поле данная лавина происходит локализовано, из-за малости амплитуды колебаний электрона под действием поля по сравнению с размерами разрядного объёма. Явление пробоя имеет пороговый характер, т. е. он происходит лишь при полях,

превышающих определённое для конкретных условий значение.

Существование порога обусловлено резкой зависимостью скорости ионизации атомов электронным ударом от поля и наличием механизмов, препятствующих развитию лавины.

Лавину тормозят потери электронов и их энергии. Энергия теряется из-за возбуждения электронных состояний атомов и молекул, молекулярных колебаний и вращений, а также упругих столкновений. Сами электроны могут диффузионно уходить из области действия поля и из-за прилипания в электроотрицательных газах. Также количество электронов может уменьшаться в следствии рекомбинации, но так как судьба лавины решается на ранних стадиях, когда электронов и ионов так мало, что их встреча маловероятна, то она влияет сильно слабее диффузии и прилипания. При поздних стадиях с большим количеством ионов и электронов наоборот, рекомбинация играет большую роль, ставя предел дальнейшей ионизации и фиксирует её уровень. Так как в нашей установке используется импульсно-периодический режим генератора, то лавина должна разрастаться достаточно быстро из-за того, что длительность импульса соразмерна времени образования лавины и она не успеет полностью разрастись.

2.2. Уравнение кинетики ионизации.

Концентрация электронов n_e как функция координат и времени подчиняется уравнению диффузии с объёмными источниками:

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} = D\Delta n_e + (v_i - v_a)n_e \quad (1)$$

В уравнении должен стоять не оператор Лапласа, а градиента.

Где n_e – концентрация электронов, D – коэффициент диффузии, v_i – частота ионизации, v_a – частота прилипания

v_i и v_a зависят от энергетического спектра электронов, который устанавливается в поле, и в предположении о квазистационарном характере спектра определяются значением поля – среднеквадратичного E . D тоже усредняется по спектру, но от E зависит слабее, поэтому этой зависимостью

можно пренебречь по сравнению с $v_i(E)$ и $v_a(E)$.

Положим, что поле однородно в пространстве, поэтому v_i и v_a не зависят от точки. Усредняя (1) по объёму получаем:

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

Где N_e – количество электронов в объёме, v_d – частота диффузионных потерь, $v_d n_e + D \Delta n_e = 0$ про оператор замечание выше. Λ – характерная диффузионная длина.

2.3. Стационарный критерий пробоя

При импульсном режиме генератора СВЧ поля, когда фронт нарастания достаточно большой, поле можно считать постоянным. Тогда $v_i(E), v_a(E) = const$ после момента $t = 0$ включения поля. И решение (2):

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

$\theta = \frac{1}{v_i - v_a - v_d}$ – постоянная времени лавины, N_{e0} – число затравочных

электронов. Тогда лавина будет развиваться при $\theta > 0$, что выполняется при превышении полем пороговой величины $E > E_t$. E_t определяется следующим соотношением, называемым стационарным критерием пробоя:

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

В нашем случае лавина электронов образуется при высоком давлении в аргоне, оценим пороговые значения E_t .

При высоком давлении диффузионные потери электронов незначительны, и даже маленькая частота ионизации может обеспечить пробой. Гораздо большее влияние имеют потери энергии из-за упругих столкновений, ограничивающие частоту ионизации.

Уравнение средней скорости для электрона в поле $E = E_0 \sin \omega t$:

$$m \dot{v} = -e E_0 \sin \omega t - m v v_m$$

Его решение:

$$v = \frac{\omega e E_0}{m(\omega^2 + v_m^2)} \cos \omega t - \frac{v_m e E_0}{m(\omega^2 + v_m^2)} \sin \omega t$$

Средняя энергия электрона за период колебаний, приобретённая от поля за

единицу времени:

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

v_m – эффективная частота столкновений, E – среднеквадратичное поле.

Пусть при упругом столкновении электрон теряет долю от своей энергии

$\delta = E_H - E_K = \frac{2m}{M}$, тогда изменение энергии:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = (\Delta\varepsilon_E - \delta\varepsilon)v_m$$

Со временем устанавливается энергия:

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

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

$$\bar{\varepsilon} = \frac{e^2 E^2 M}{2m^2 v_m^2}$$

Для пробоя средняя энергия должна равняться энергии ионизации аргона E_{Ar}^*

$$E_{Ar}^* = \frac{e^2 E_t^2 M}{2m^2 v_m^2}, \quad E_t = \frac{m v_m}{e} \sqrt{\frac{2E_{Ar}^*}{M}}$$

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

v_c – обычная частота упругих столкновений, можно использовать её значение, найденное опытным путём:

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

p – давление, P_c – вероятность столкновений (число столкновений, которые частица испытывает на пути в 1 см) при давлении газа $p = 1$ торр и температуре $T = 0^\circ\text{C}$, определяется через сечение столкновений:

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

тогда:

$$E_t = \frac{3,36 \cdot 10^{-2} \cdot m E_{Ar}^* p P_c}{e \sqrt{M}} = \frac{3,24 \cdot 10^{17} \cdot m E_{Ar}^* p \sigma}{e T \sqrt{M}}$$

Подставляя значения $T = 293 \text{ K}$, $\sigma = 1,005 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$, $E_{Ar}^* = 15,76 \text{ эВ}$, $e =$

$1,60 \cdot 10^{-19}$ Кл, $m = 9,11 \cdot 10^{-31}$ кг, $M = 6,4 \cdot 10^{-26}$ кг, $p = 760$ торр

$$E_t = 2,96 \cdot 10^5 \frac{\text{В}}{\text{м}}$$

3. Описание Экспериментальной установки

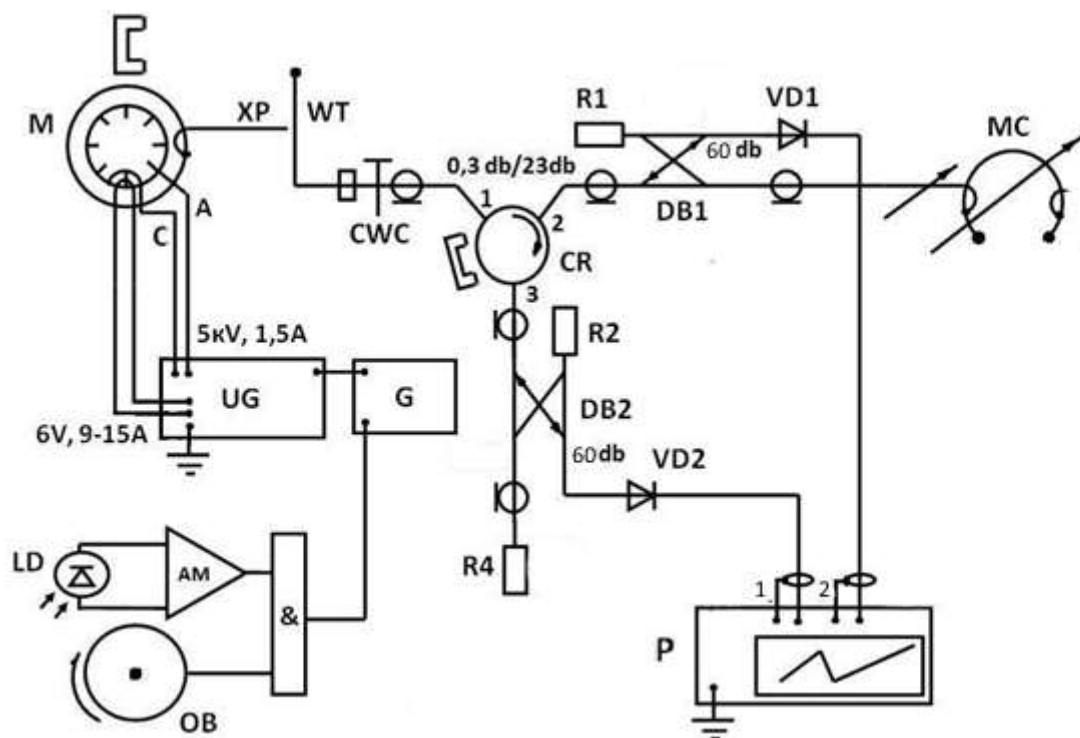


Рис.1. Принципиальная электрическая схема СВЧ установки для вневакуумной имплантации.

Анод магнетрона (М) питается за счёт импульсного источника (UG), у которого существует режим обратной связи по току, напряжению анода и току накала, позволяющий стабилизировать и управлять мощностью магнетронной лампы. Для формирования импульсов запуска анодного напряжения используется генератор (G). Его регулирование позволяет выбрать задержку от 100 нс до 10 мкс и длительность импульса от 0,5 до 100 мкс. В результате через штырь магнетрона (XP) в прямоугольный волновод (WT) поступает СВЧ сигнал с регулируемой амплитудой и скважностью.

Дальше они поступают через коаксиально-волноводный переход (CWC) на вход 1 циркулятора (CR). Из него через вход 2 сигнал идёт через петлю связи на технологическую головку (MC), откуда уже поступает в сам резонатор. Петля связи включает в себя направленный ответвитель (DB1), ослабляющий сигнал на 40 Дб, аттенюатор (20 Дб) и детекторную головку (VD1). Отражённая от резонатора волна попадает на вход 3 циркулятора, после чего, также проходя через петлю связи с направленным ответвителем (DB2) и детекторной головкой с аттенюатором (VD2), поглощается в согласованной нагрузке (R4). Для отвода тепла от этой нагрузки используется водяное охлаждение. Сигналы с петель связи поступают для регистрации на входы (1) и (2) осциллографа (P).

3.1. Квазицилиндрический резонатор.

Ключевое различие квазицилиндрического резонатора от обыкновенного цилиндрического является его конусообразная форма, из-за которой плотность поля становится смещённой к области инициации плазмы. За счёт этого поле в области подачи СВЧ энергии становится недостаточным для пробоя и перегородка, отделяющая её от камеры инициации плазмы, становится ненужной, что позволяет создать сзади резонатора отверстие, диаметром меньше половины длины волны СВЧ для отсутствия потерь энергии, через которое можно вводить энергию CO₂-лазера.

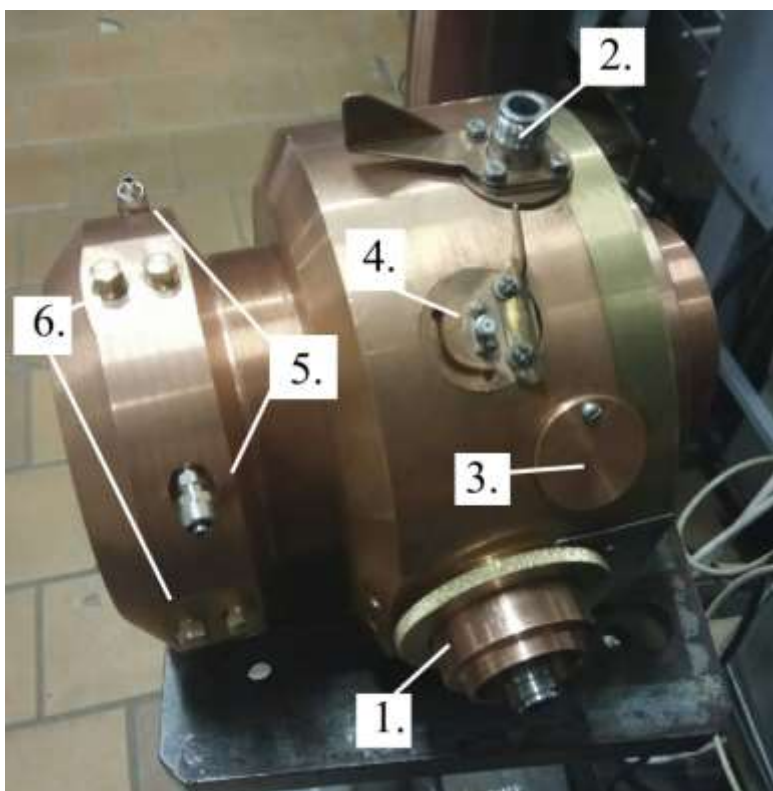


Рис. 2, квазицилиндрический резонатор. 1 – место подключения волновода к технологической головке, 2 – резервное место подключения к петлевому выходу, переоборудован под отверстие для манометра, 3 – резервное окно, 4 – петля связи для измерения поля внутри резонатора, 5 – штуцеры для подключения трубок с аргоном, 6 – заглушки для окон.

Само поле достигает нужных значений за счёт резонанса. Попадая в резонатор, волны электрического поля начинают многократно отражаться от оснований резонатора, интерферируя друг с другом. При определённом положении источника поля в резонаторе образуется стоячая волна, амплитуда которой, за счёт многократной интерференции волн, будет гораздо больше, чем амплитуда отдельной волны. Частота этой волны называется резонансной частотой резонатора. Для настройки частоты в конструкции предусмотрено изменение положения штыря внутри резонатора, а также малое изменение объёма резонатора за счёт вкручивания его части.

У резонатора есть ещё одна характеристика, называемая добротностью резонатора – отношение средней энергии, запасённой в резонаторе, к энергии, теряемой за период колебаний. Она определяется лишь материалом резонатора и его формой.

$$Q = \omega_0 \frac{\text{Запасенная энергия}}{\text{мощность потерь}} = \frac{\omega_0}{\Delta\omega} = \frac{G}{R}$$

ω_0 - собственная частота резонатора, $\Delta\omega$ - разность частот с амплитудой $\frac{1}{\sqrt{2}}$ от максимальной, G – геометрический коэффициент, R – сопротивление материала. Геометрический коэффициент зависит от объёма и площади внутренней поверхности резонатора, но т. к. изменения объёма при его настройке малы, добротность почти не меняется.

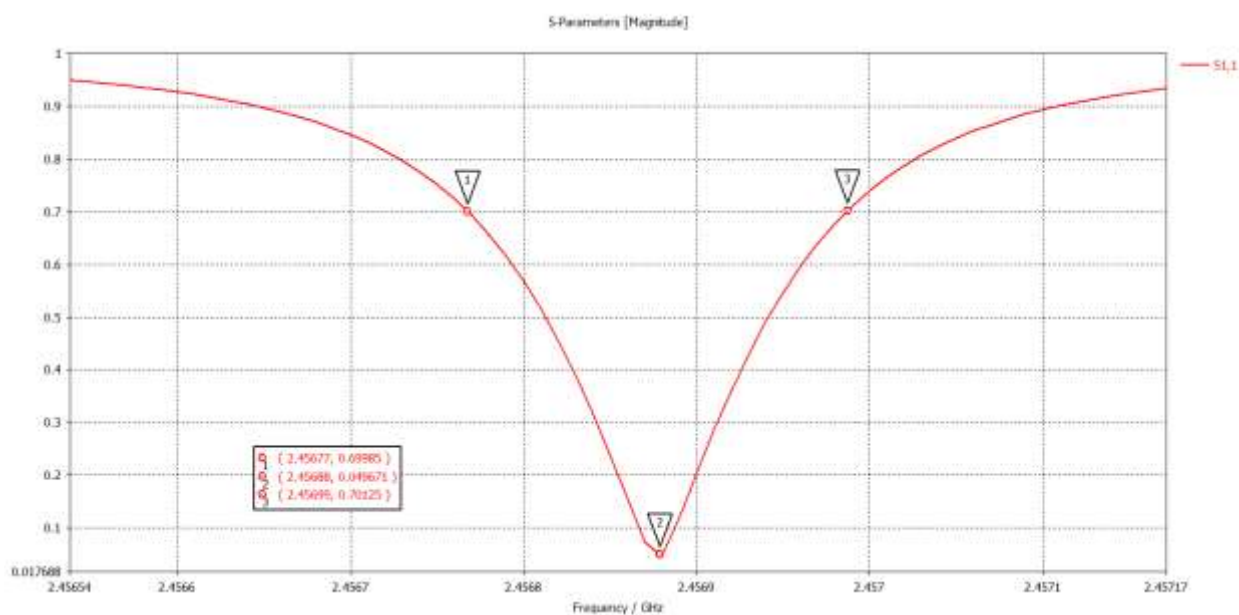


Рис. 3 график не поглощённой мощности в резонаторе, при его отражении от горизонтальной оси будет получена АЧХ резонатора.

Расчёт конфигурации поля уже был выполнен сотрудниками лаборатории и показан на рис. 1.

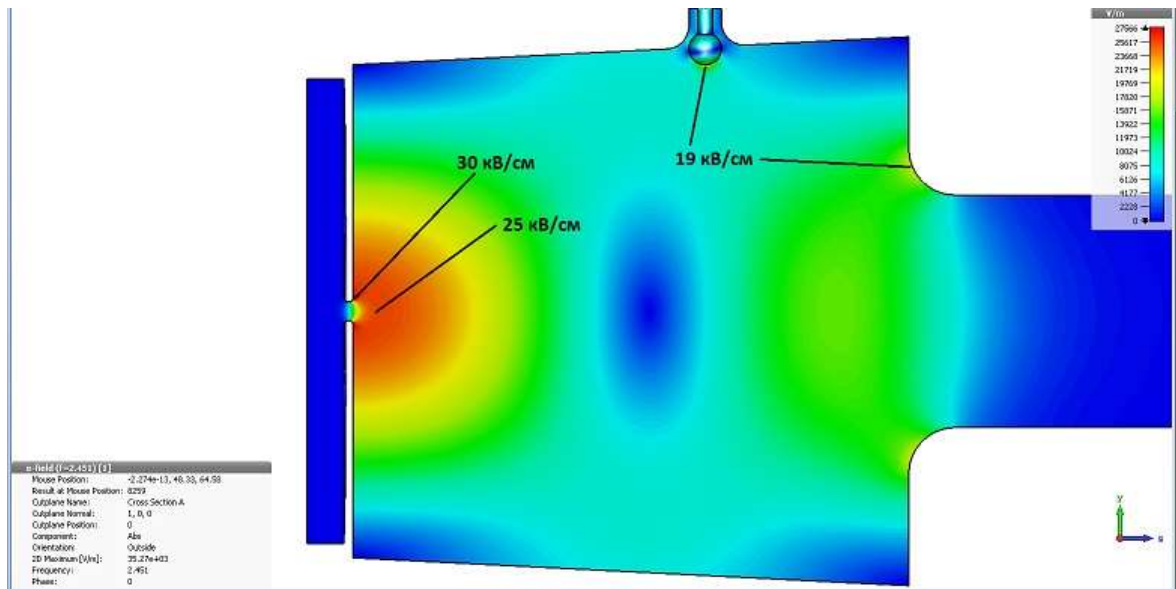


Рис. 4, Расчёт конфигурации электрического поля в квазицилиндрическом резонаторе, $f = 2,46$ ГГц, $P = 3$ кВт

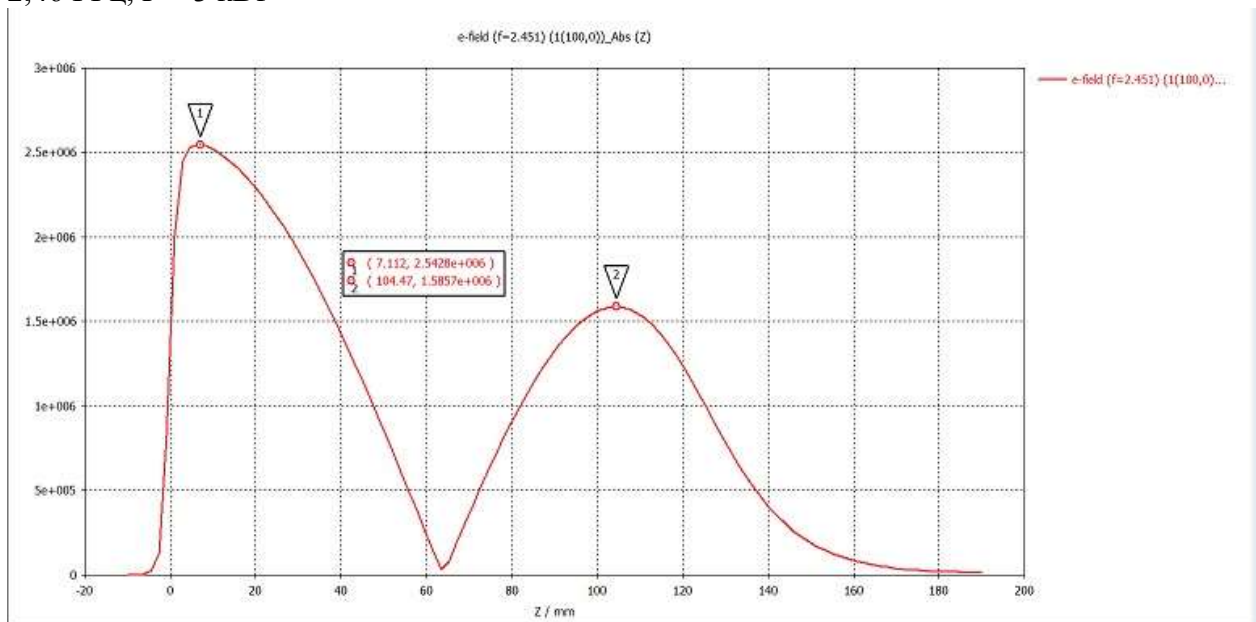


Рис. 5, осевое распределение поля при собственной частоте резонатора и мгновенной мощности $P = 3$ кВт. Также из графика видно, что при выходе из резонатора длиной 120мм поле быстро убывает.

В нашей установке переход от коаксиального волновода к штырю внутри резонатора осуществляется через разъем с максимально допустимой средней мощностью $P_{ср} = 400$ Вт. Исходя из этого и параметров импульса можно узнать, хватит ли мощности для зажигания плазмы.

$$\frac{P_1}{P_{ср}} = \frac{T}{\tau} = k = 30$$

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

Тогда можно найти минимальную среднюю мощность, которую нужно подавать для зажигания плазмы при определённом уровне скважности и давления $p = 760$ торр внутри него:

$$E_t = 2.96 \cdot 10^5 \frac{\text{В}}{\text{м}}, \quad E = 2.54 \cdot 10^6 \sqrt{\frac{P_i}{3000} \frac{\text{В}}{\text{м}}} = E_t$$
$$P_i = k \cdot P_{\text{cp}} = \left(\frac{2.96 \cdot 10^5}{2.54 \cdot 10^6} \right)^2 \cdot 3000, \quad P_{\text{cpmin}} = \frac{408.26}{k} \text{ Вт}$$

При скважности $k = 30$:

$$P_{\text{cpmin}} = 1.36 \text{ Вт}$$

$k = 10$:

$$P_{\text{cpmin}} = 4.07 \text{ Вт}$$

$k = 15$:

$$P_{cpmin} = 2.72 \text{ Вт}$$

Положение резонанса определяется по графикам прямой и отражённой волн в коаксиальном кабеле, измеряемых с помощью детекторных головок VD1 и VD2: При наступлении резонанса резонатор начинает потреблять больше энергии, из-за чего отражённая волна сильно понижается.

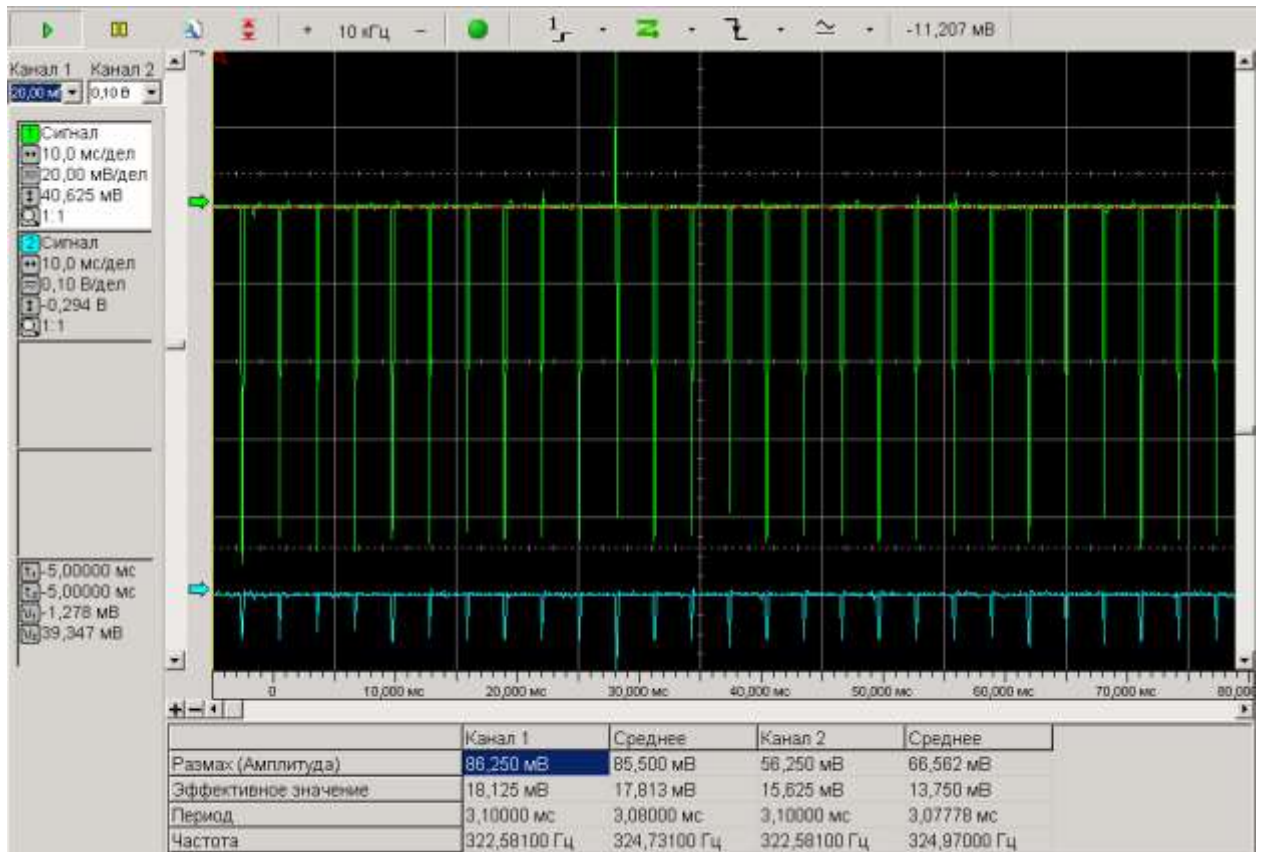


Рис. 6 Осциллограмма импульсов отражённой (зелёный цвет) и прямой (голубой цвет) волн при расстроенном резонаторе.

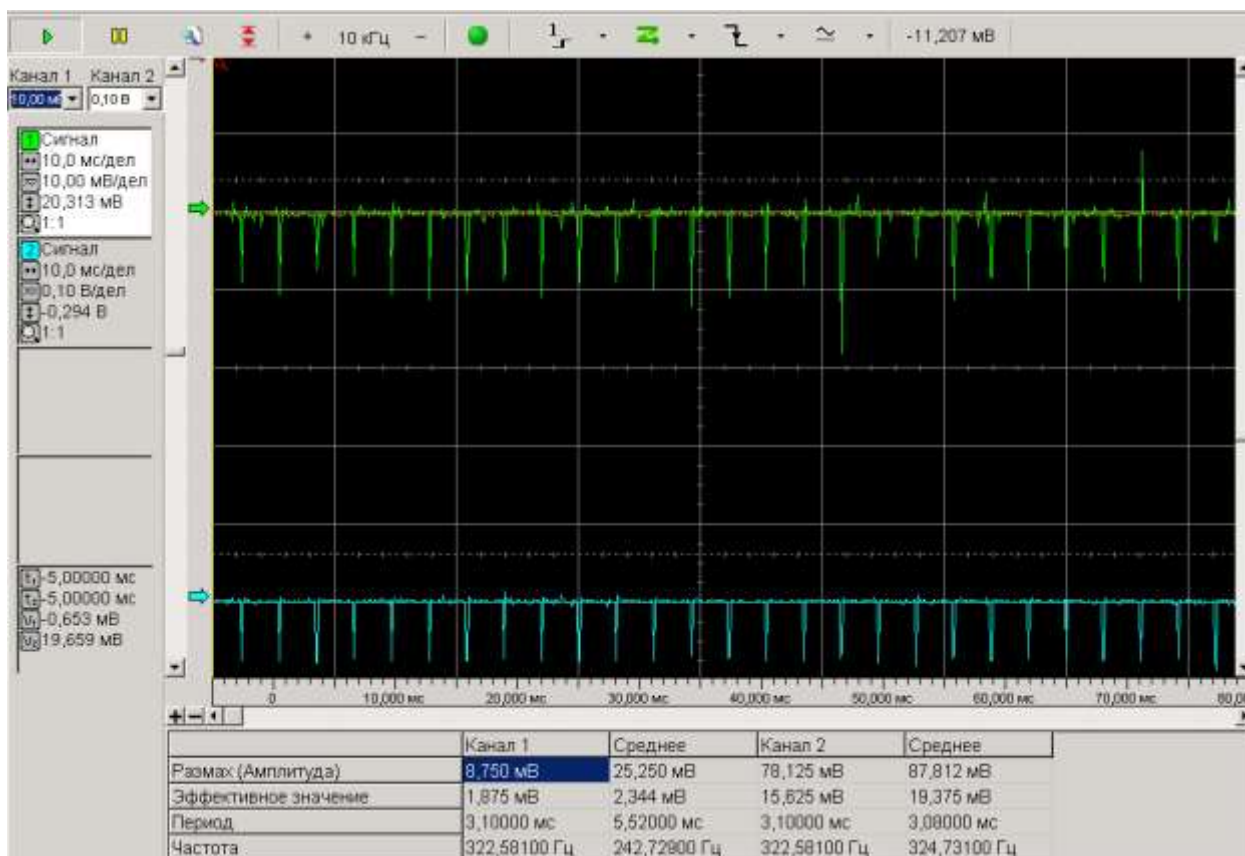


Рис. 7 Осциллограмма импульсов отражённой (зелёный цвет) и прямой (голубой цвет) волн при настроенном резонаторе.

При возникновении плазмы добротность резонатора повышается и потребность в пороговом поле пропадает. Это происходит из-за возрастания потерь энергии в резонаторе, обусловленных повышением интенсивности диссоциативной рекомбинации частиц. Тогда главным фактором для поддержания плазмы будет подаваемая к резонатору мощность.

3.2. Методика измерений подаваемой на резонатор мощности, поля в области инициации плазмы и давления внутри резонатора.

Для измерения мощности, подаваемой на резонатор будем использовать две термисторные головки, находящиеся на местах детекторных головок VD1 и VD2. Тогда разность данных мощностей будет мощностью, поглощаемой резонатором. Для уменьшения количества измерений можно отдельно найти долю поглощаемой

$$\text{мощности } \eta = \frac{P_{\text{вход}} - P_{\text{отр}}}{P_{\text{вход}}}$$

Давление измеряется с помощью манометра, подключённого к резонатору через отверстие.

4. Результаты и обработка измерений.

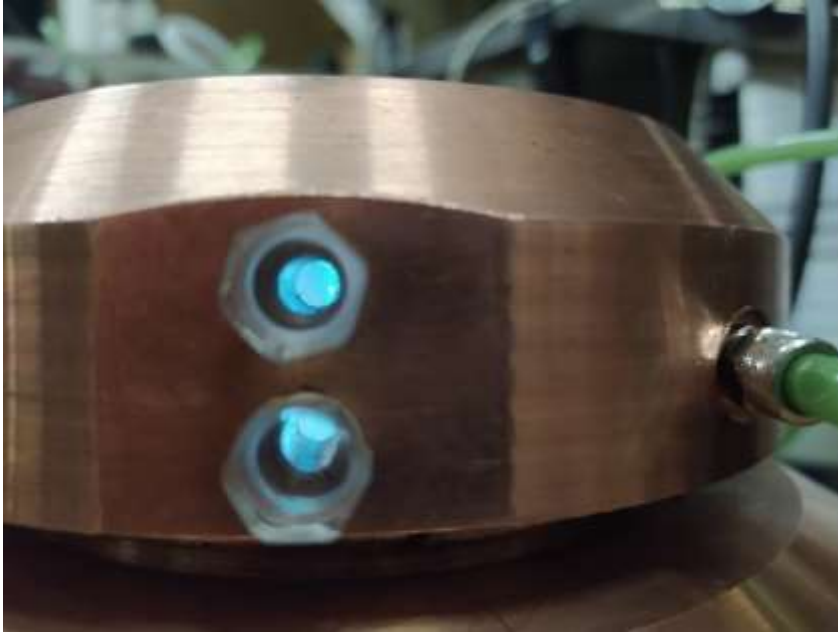


Рис. 8, плазма внутри резонатора.

$$P_{\text{вход}} = 90 \text{ Вт}, \quad P_{\text{отр}} = 60 \text{ Вт}$$

$$\eta = 0,33, \quad P_{\text{ср}} = P_{\text{вход}} \cdot \eta$$

№	Период импульса t, мс	Скважность k	$P_{\text{вход}}$, Вт	$P_{\text{ср}}$, Вт	$P_{\text{ср}}$ теоретическое, Вт
1	3	10	46	15,33	4,07
2		15	28	9,33	2,72
3		30	22	7,33	1,36
4	30	10	45	15	4,07
5		15	27	9	2,72
6		30	21	7	1,36

Погрешность ваттметра $\Delta P = 1 \text{ Вт}$

Экспериментальные данные довольно сильно отличаются от теоретических. Это объясняется большой добротностью резонатора, малой шириной резонансной кривой и малой точностью настройки резонатора. Из-за этих факторов установка находилась лишь в частичном резонансе, и требовала большей мощности для инициации плазмы. Также у резонатора были подвижные части в виде технологической головки и выкручиваемой части, которые могли уменьшить эффективность резонанса.

Тогда можно вычислить ожидаемую величину расстройки резонатора:

$$E = 2,54 \cdot 10^6 \sqrt{\frac{P_i}{3000}} = 6,7 \cdot 10^5 \frac{\text{В}}{\text{м}}, \quad E_0 = \frac{6,7 \cdot 10^5}{(1 - 0,05)} \frac{\text{В}}{\text{м}} = 7,07 \cdot 10^5 \frac{\text{В}}{\text{м}}$$

$$\frac{E_t}{E_0} = 0,42$$

$$\Delta\omega = 2,45696 - 2,45678 = 0,18 \text{ МГц}$$

Как и предполагалось, для поддержания плазмы нужна бóльшая средняя мощность, для которой нужен разъем, который может выдержать эту мощность

5. Выводы.

В ходе эксперимента была настроена установка и инициирована плазма в аргоновой атмосфере при импульсно-периодическом режиме работы СВЧ генератора. Были найдены оптимальные параметры для начала процесса инициации, величина расстройки резонатора и выяснилась маленькая точность настройки резонатора, а также недостаточный для поддержания горения плазмы разъем. В будущем предполагается заменить этот разъем, улучшить систему настройки резонатора и добиться выхода плазмы из его сопла.

6. Благодарности.

Выражаю благодарность моему научному руководителю, Медведеву Алексею Эдуардовичу.

7. Список литературы.

- 1) Райзер Ю. П. Физика газового разряда: учебное руководство: для вузов -- 2-е изд., перераб и доп. – М Наука Гл. ред. физ.-мат. лит., 1992 – 536 с.