

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»  
(НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ, НГУ)**

**Физический факультет**

**Выпускная квалификационная бакалаврская работа**

**Кафедра физики плазмы**

Карелин Вадим Александрович

---

**Название работы:**

**Разработка геликонного источника плазмы для линейной установки по изучению  
взаимодействия плазмы с материалами**

**Научный руководитель:**

**к.ф.-м.н. Шиховцев Игорь Владимирович**

**Новосибирск – 2014год**

# **Содержание**

<b>1. Введение</b>	<b>3</b>
<b>2. Технические характеристики и конструкторские решения для геликонного источника плазмы</b>	<b>5</b>
<b>3. Механизм возникновения геликонных волн</b>	<b>10</b>
<b>4. Анализ параметров системы и их влияние на возникновение мод геликонной волны</b>	<b>13</b>
<b>5. Результаты, полученные в ходе выполнения работы и их обсуждение</b>	<b>19</b>
<b>6. Заключение</b>	<b>26</b>
<b>7. Список литературы</b>	<b>27</b>

## 1. Введение

Широко распространенные в наше время источники плазмы находят всё большее применение в самых разнообразных областях науки и техники. Принцип действия плазменных источников основывается на различных методах ионизации газа: ионизация молекул газа электронным ударом, ионизации в газовом разряде и др. Источники плазмы используются в термоядерных системах для поддержания температуры и плотности плазмы, так же есть много бытовых применений: источник света, плазменная обработка материалов и др. [5,6,7,8]

По принципу действия одним из самых распространённых является дуговой источник. Для экспериментального изучения пристеночных процессов и воздействия плазмы на материалы, которые предполагается использовать для внутренней облицовки установок термоядерного синтеза, в Исследовательском Центре Юлих (Германия) работает плазменная установка с прямым магнитным полем. Источником плазмы является как раз дуговой источник плазмы с накаливаемым катодом, ресурс работы которого сильно ограничен процессами распыления. В связи с этим, предполагается заменить источник плазмы с накаливаемым катодом на высокочастотный геликонный источник, который является одним из наиболее перспективных источников плазмы для линейной плазменной ловушки [2,3]. Высокая эффективность разряда такого типа позволит создать плазму с высокой плотностью. Важная особенность разряда – генерация плазмы вблизи оси плазменной камеры – позволит сделать минимальными потери плазмы на стенки камеры, и, следовательно, снизить тепловые нагрузки и перейти к квазистационарному режиму работы.

В ходе начального этапа работы должен быть разработан геликонный источник плазмы, измерены его основные параметры: температура и плотность плазмы.

В главе **«Технические характеристики и конструкторские решения для геликонного источника плазмы»** описано устройство геликонного источника плазмы, приведены параметры источника, разрабатываемого в Институте ядерной физики.

В главе **«Механизм возникновения геликонных волн»** описан естественный механизм возникновения геликонных волн.

В главе **«Анализ параметров системы и их влияние на возникновение мод геликонной волны»** произведён расчет параметров системы, благоприятных для возникновения геликонной волны.

Далее, в главе **«Результаты, полученные в ходе выполнения работы и их обсуждение»** приведены результаты и сделаны выводы о появлении геликонного режима разряда.

В конце дано заключение, оценка результатов полученных в ходе выполнения работы, а так же приведен список литературы.

## 2. Технические характеристики и конструкторские решения для геликонного источника плазмы.

Конструкция источника следующая (рис.1). Газоразрядная камера изготовлена из кварцевой трубы (внешний диаметр 108 мм, толщина стенки 2.5 мм, длина 400 мм). Рабочий газ (водород) подается в камеру с помощью импульсного клапана. Высокочастотный (ВЧ) разряд возбуждается на частоте 13.56 МГц при помощи внешней антенны, которая изготовлена из медной трубки диаметром 6 мм. Форма двух типов антенн (так называемые Nagoya type III или геликонная) показана на рисунке 2. В работе использовалась антенна Nagoya type III.

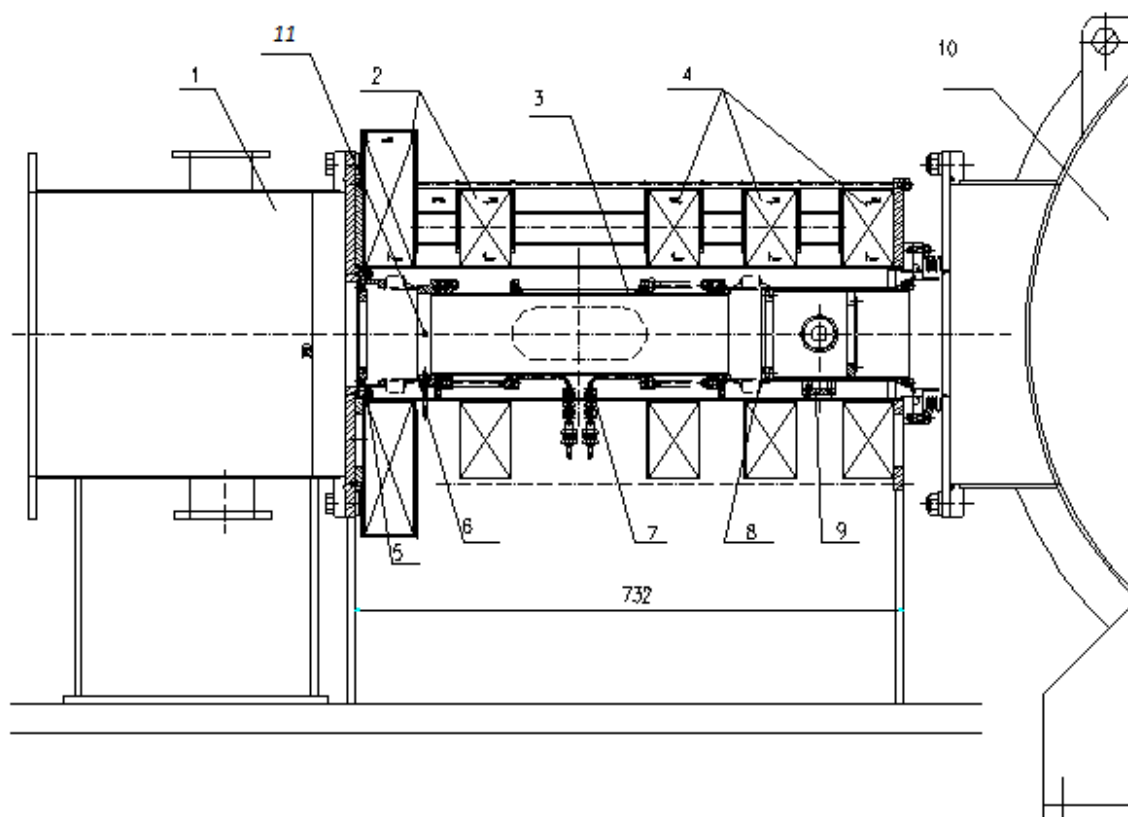


Рис.1. Геликонный источник: 1- расширительный объем, 2 – катушки магнитного поля, 3 – кварцевая труба, 4 – катушки магнитного поля, 5 – лимиттер, 6 – напуск газа, 7 – антенна, 8 – лимиттер, 9 – фланец для зондов, 10 – вакуумный объем стенда, 11 – поджиг.

Разряд зажигается в камере при подаче ВЧ-напряжения на антенну и подаче газа. Иницирует разряд накаливаемый поджиг, который

представляет из себя вольфрамовую нить, намотанную на кварцевую трубку диаметром 1.2 мм (10 витков), помещенную в вакуумную камеру. При протекании тока по нити, происходит эмиссия электронов. Камера с антенной находится в магнитном поле, которое создается внешними катушками. Плазма в геликонном источнике в основном нарабатывается в приосевой области и распространяется вдоль силовых линий. Для исключения контакта плазмы с кварцевой стенкой установлены лимитеры, к которым подходят крайние силовые линии, которые еще не контактируют с кварцевой стенкой.

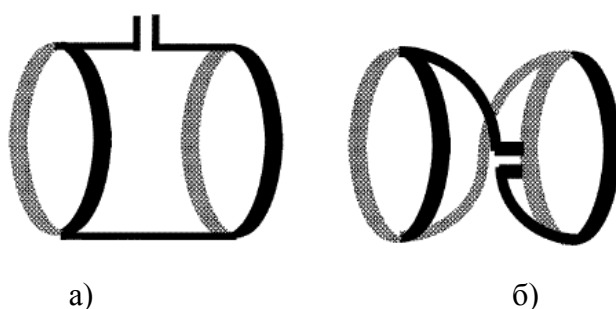


Рис.2. Два типа антенн: а) Nagoya type III, б) геликонная.

Источник подсоединен к вакуумному объему стенда. Откачка производится турбомолекулярным и форвакуумным насосами. Давление в камере источника 5-15 мТорр, начальный вакуум в установке  $10^{-7}$  Торр.

В качестве источника высокочастотной мощности используется промышленный генератор COMDEL CB-5000 мощностью до 5 кВт.

Антенна соединяется с источником с помощью согласующей схемы, в которой нагрузкой являются плазма и антенна (рис.3). Очень важно, чтобы схема была согласованной, т.е. нагрузка была той, на которую рассчитан генератор (50 Ом). Ниже приведена согласующая схема.

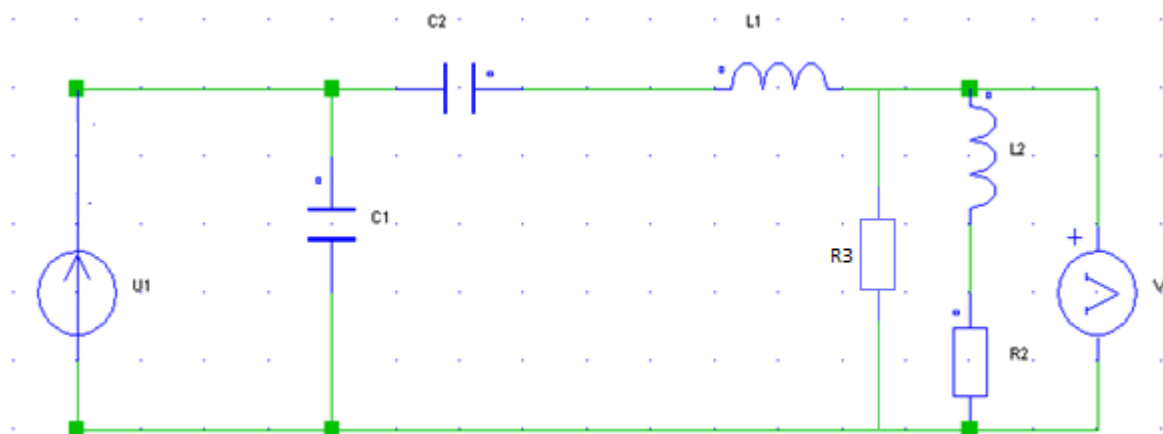


Рис. 3. Согласующая схема между генератором и нагрузкой.

$U_1$  - генератор,  $C_1=1330$  пФ,  $C_2=367$  пФ,  $L_1 = 50$  нГн– паразитная индуктивность,  $L_2 = 400$  нГн– антенна,  $R_2 = 0.1$  Ом – потери в антенне,  $R_3$  – сопротивление плазмы.

В программе NL5 модулировалось поведение схемы на нужной нам частоте – 13.56 МГц. Элементы подбирались для максимального согласования (уменьшения отраженной мощности).

Для измерения параметров плазмы используется тройной ленгмюровский зонд. В дальнейшем будет использован интерферометр. Параметры плазмы измерялись в зависимости от напуска газа в источник, от ВЧ мощности, поглощаемой в разряде, от напряженности внешнего магнитного поля.

Основные параметры источника плазмы приведены в Таблице 1.

Таблица 1. Параметры источника плазмы.

Параметр	Значение
Рабочий газ	Водород
Тип разряда	Высокочастотный
Рабочая частота	13.56 МГц
ВЧ мощность	до 5 кВт
Плотность плазмы	$10^{11} \div 10^{12} \text{ см}^{-3}$
Температура плазмы	$1 \div 10$ эВ
Длительность импульса плазмы	$1 \div 2$ сек

Данный этап работы предполагает короткую длительность работы источника плазмы - 1÷2 сек. Экспериментальные данные будут обсуждены и будет принято решение о продолжении развития этой темы, которая предполагает увеличение параметров источника – ВЧ мощности, длительности работы.

Катушки магнитного поля (рис.4) имеют внутренний диаметр 184 мм, сечение 66 мм x 100 мм, медная шина сечением 4x2 мм<sup>2</sup>, В пробочной катушке количество витков 976 витков, в остальных по 490 витков. Максимальный расчетный ток в катушках 50А. На рисунке 4 приведена конфигурация магнитных катушек. Расчет магнитного поля произведен программой SAM, разработанной в ИЯФ. В области антенны напряженность магнитного поля около 2.7 кГс. Максимальное поле в пробке – 5.6 кГс. Распределение магнитного поля приведено на рисунке 5.

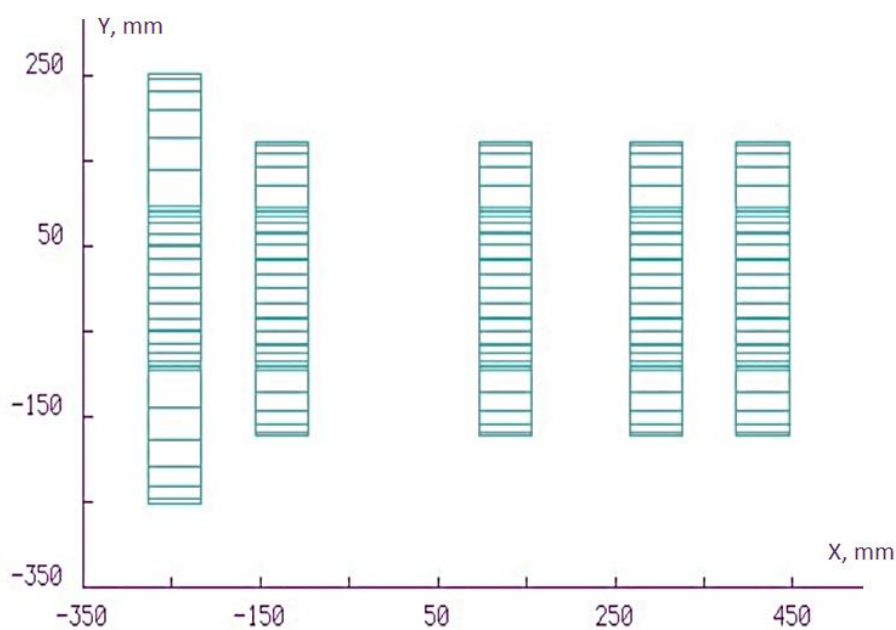


Рис.4. Конфигурация катушек.



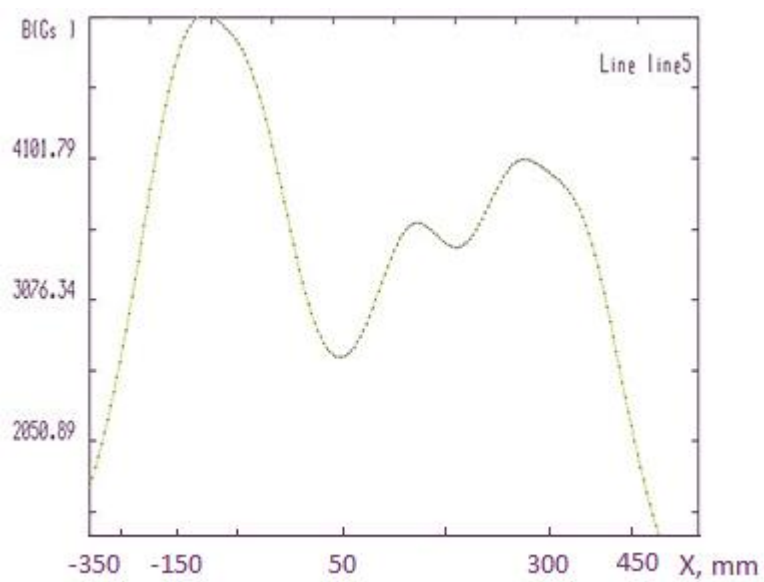


Рис.5. Распределение магнитного поля.

### 3. Механизм возникновения геликонных волн.

Первые сообщения о геликонных волнах пришли еще в начале 20-го века. Электромагнитный импульс, вызванный вспышками молнии, распространяется вдоль силовых линий магнитного поля Земли. Доходя до магнитного полюса Земли, он преобразуется в акустические волны. И так как высокочастотные гармоники летят с большей скоростью, то регистрируя их на полюсах, мы фиксируем спуск по частоте приходящих гармоник. Такой эффект похож на свист, что и дало название таким волнам – вистлеры или геликоны.

Для создания геликонных волн в плазме в лабораторных условиях предназначен источник, описанный ранее. Антенна возбуждает моды геликонных волн в плазме, при определенных параметрах: магнитном поле, размере антенны, трубки и др. (см. в след. разделе).

Геликонному разряду предшествуют емкостной и индуктивный. Каждый из них соответствует определенной мощности, величине магнитного поля, напуску газа и других условий.

Далее приведено описание режимов разряда [1]:

Геликонный источник может работать при низкой плотности (малой поглощаемой мощности) в режиме без геликонных волн. В этом случае возникает емкостной разряд за счет напряжения, приложенного к выводам антенны. При больших мощностях разряд переходит в индуктивную моду. Ток, текущий по антенне создает индуцированное высокочастотное электрическое поле, что так же влияет на ионизацию газа.

Итак, разряд может существовать в трех модах: емкостной (E-mode), при низкой мощности, индуктивной (H-mode), при средней мощности и, наконец, геликонной (W-mode), при высокой мощности. С увеличением мощности наблюдаются E-H-W-переходы (рис.6). Увеличение давления связано с увеличением плотности заряженных частиц.

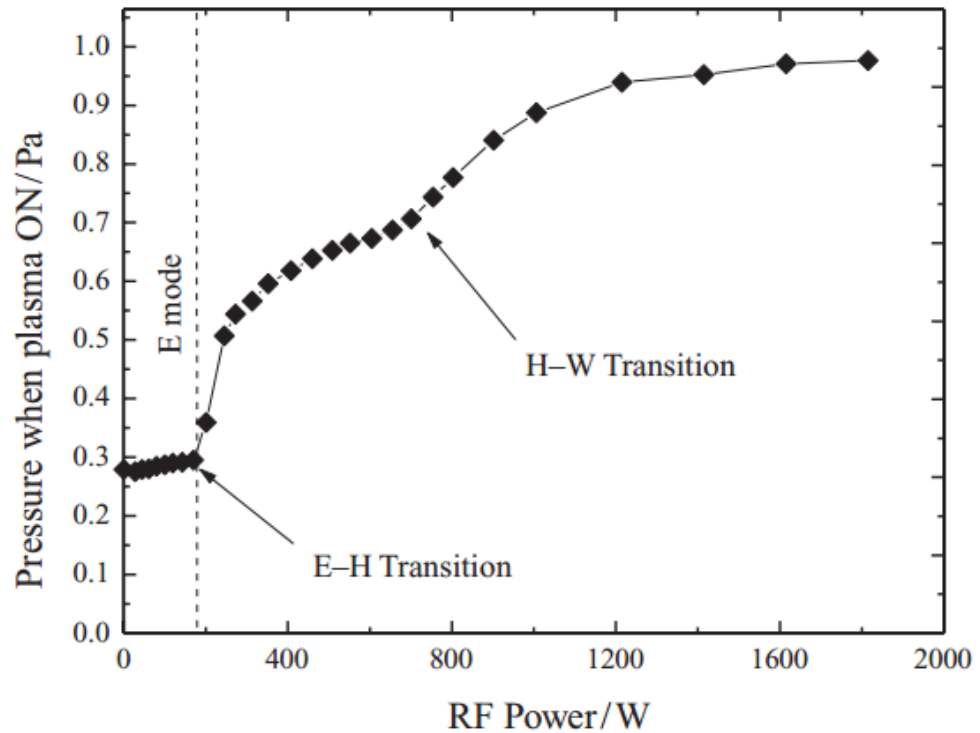


Рис.6. Давление плазмы (газа  $\text{SF}_6$ ), измеренное вблизи стенки в геликонном источнике.

Переходы между модами в геликонном источнике можно понять так же взглянув на рис.7. Сплошные линии показывают поглощаемую мощность в плазме, пунктирная – мощность потерь. Нижняя кривая поглощаемой мощности пересекает прямую мощности потерь в емкостной области разряда, при низкой плотности (E-mode). Далее емкостной разряд прекращается. С увеличением тока в антенне начинается индуктивный разряд (H-mode) – вторая кривая на рисунке 7 и заканчивается с пересечением прямой мощности потерь при плотности  $10^{10} \text{ см}^{-3}$ . Наконец, при ещё более высоком токе в антенне наступает переход в геликонный режим разряда (H-mode). При плотности  $10^{12} \text{ см}^{-3}$  начинает распространяться первая продольная геликонная мода (см. след. раздел).

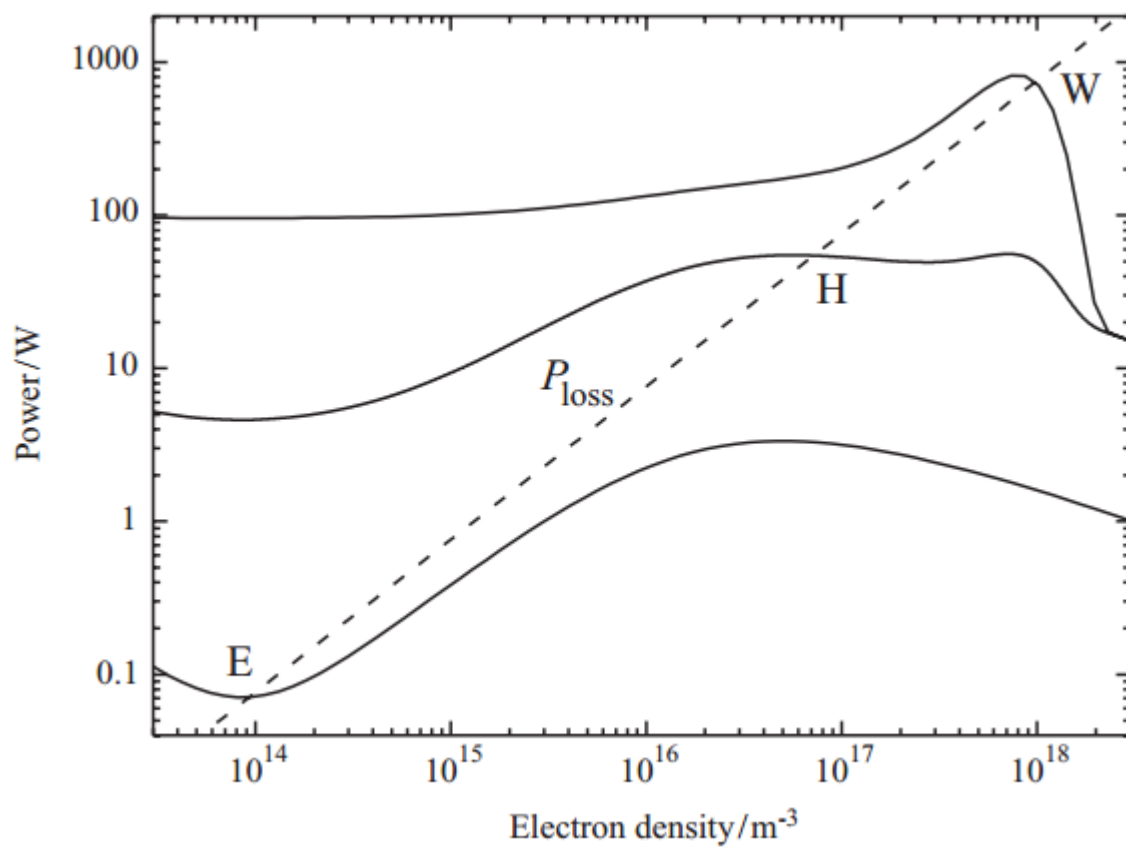


Рис.7. Схематическое изображение мощности, необходимой для E-H-W режимов разряда.

#### **4. Анализ параметров системы и их влияние на возникновение мод геликонной волны.**

В упрощённом виде теория геликонных волн рассмотрена в литературе [1]. Добавление постоянного магнитного поля к плазме имеет два важных следствия. Во-первых, уменьшается поперечный перенос плазмы. Во-вторых, постоянное магнитное поле дает возможность распространяться низкочастотным электромагнитным волнам (частота ниже плазменной). Класс таких волн называется вистлеры (whistlers). Геликонные волны - правополяризованные, с частотой, лежащей между циклотронной ионной и электронной частотами, вистлеры.

Таким образом, поле можно использовать для изменения профиля плотности плазмы, при заданной мощности и температуре. Помимо этого поле оказывает влияние на появление геликонной волны.

Чтобы описать распространение геликонной волны в плазме, рассмотрим простой случай бесконечного столба однородной плазмы. При включении магнитного поля отклик среды (плазмы) на поле становится анизотропным и вводят тензор диэлектрической проницаемости. Иначе говоря, дисперсия электромагнитных волн зависит от направления волнового вектора по отношению к направлению магнитного поля. Заряженные частицы вращаются вокруг силовых линий магнитного поля, что приводит к анизотропии, как следствию воздействия Лоренцевской силы, перпендикулярной движению частиц. Геликонные волны распространяются вдоль силовых линий магнитного поля (направим его вдоль оси  $z$ ). Для бесстолкновительного случая в холодной плазме и когда волновой вектор волны направлен вдоль направления магнитного поля имеем следующие дисперсионные выражения [1]:

$$n_{\text{ref,R}}^2 = \frac{k^2 c^2}{\omega^2} = 1 + \frac{\omega_{\text{pe}}^2}{\omega \omega_{\text{ce}} \left( 1 + \frac{\omega_{\text{ci}}}{\omega} - \frac{\omega}{\omega_{\text{ce}}} \right)},$$

$$n_{\text{ref,L}}^2 = \frac{k^2 c^2}{\omega^2} = 1 - \frac{\omega_{\text{pe}}^2}{\omega \omega_{\text{ce}} \left( 1 - \frac{\omega_{\text{ci}}}{\omega} + \frac{\omega}{\omega_{\text{ce}}} \right)}.$$
(1.1)

Первое уравнения как раз соответствует правополяризованной (геликонной) волне.

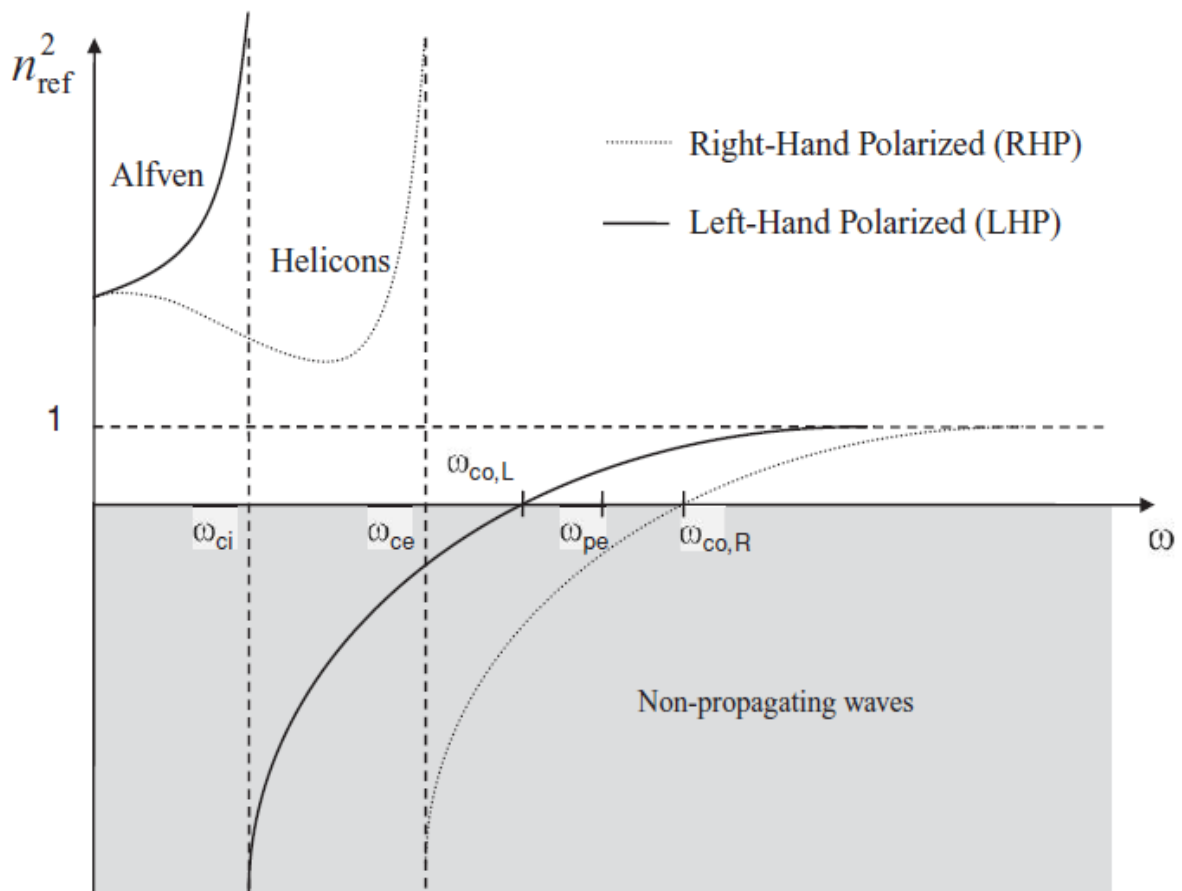


Рис.8 График зависимости показателя преломления в зависимости от частоты.

Как видно из приведенного графика (рис.8) чисто геликонная волна возбуждается в частотном диапазоне между циклотронными ионными и электронными частотами.

Посчитаем частоты для предполагаемых в начале параметров нашей установки.

Напряженность магнитного поля  $B=0.03\text{Т}$ . Плотность плазмы  $10^{18}\text{ м}^{-3}$ .

Частоты:

$$\omega_{\text{pe}} = 5.7 \cdot 10^{10}$$

$$\omega_{\text{ci}} = 2.3 \cdot 10^6$$

$$\omega_{\text{ce}} = 5.3 \cdot 10^9$$

$$\omega = 8.5 \cdot 10^7$$

Как видно частотные условия на геликонную волну выполняются.

$$\omega_{\text{ci}} \ll \omega \ll \omega_{\text{ce}} \ll \omega_{\text{pe}}$$

Эти условия упрощают дисперсионные выражения (1.1).

$$n_{\text{ref}}^2 = \frac{\omega_{\text{pe}}^2}{\omega \omega_{\text{ce}}}$$

При учете существования угла между полем и волновым вектором волны будет:

$$n_{\text{ref}}^2 = \frac{\omega_{\text{pe}}^2}{\omega (\omega_{\text{ce}} \cos \theta - \omega)}$$

При нулевом угле получаем дисперсионное выражение полученное ранее.

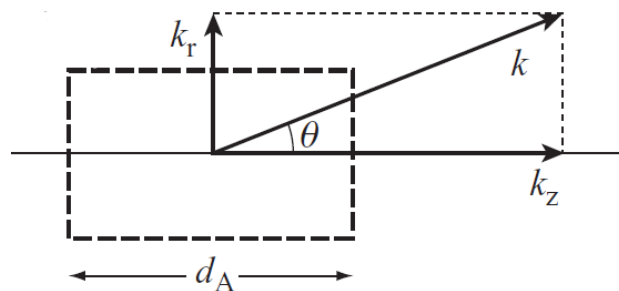


Рис.9. Компоненты волнового вектора относительно антенны.

В ограниченных системах компоненты электромагнитных полей должны удовлетворять граничным условиям. Уравнения Максвелла решаются с соблюдением радиальной структуры полей геликонной волны в цилиндре радиуса  $r_0$ , равномерной плазмы и постоянного однородного магнитного поля. В результате:

$$\begin{aligned}\tilde{B}_r &= A [(k + k_z) J_{m-1}(k_r r) + (k - k_z) J_{m+1}(k_r r)], \\ \tilde{B}_\varphi &= iA [(k + k_z) J_{m-1}(k_r r) - (k - k_z) J_{m+1}(k_r r)], \\ \tilde{B}_z &= -2iA J_m(k_r r),\end{aligned}$$

$$k_r^2 + k_z^2 = k^2 ;$$

$A$  – независимая амплитуда поля,  $m$  – азимутальная мода,  $k$  – амплитуда волнового вектора,  $k_z$  и  $k_r$  соответственно продольная и радиальная компоненты волнового вектора. [9]

Граничные условия в точке  $r=r_0$  требуют  $B_r=0$  [9]:

$$m k J_m(k_r r_0) + k_z J'_m(k_r r_0) = 0.$$

Отсюда находятся компоненты волнового вектора (рис.9).

Уравнения определяют собственные значения волнового вектора и для случая  $m=0$  существенно упрощаются. Однако антенна в нашем случае соответствует  $m=1$ . И ее геометрия определяет продольные компоненты волнового вектора геликонных волн:

$$k_z = (2\chi + 1) \frac{\pi}{d_A}.$$

$d_A$  – длина антенны,  $\chi$  – продольная мода.

Таким образом, используя данную систему уравнений и дисперсионное уравнение, получаем дискретный набор компонент волнового вектора



геликонной волны и плотности плазмы, необходимых для возникновения данной волны.

Далее приведены результаты расчета для различных магнитных полей. Расчеты в таблице 1 приведены для поля 0.27 Тл (максимального поля) и однородного профиля плазмы. В таблице 2 для поля 0.03 Тл.

Номер моды	Плотность, $\frac{1}{\text{см}^3}$
0	$1.8 * 10^{13}$
1	$8.3 * 10^{13}$
2	$2 * 10^{14}$
3	$3.7 * 10^{14}$
4	$6.1 * 10^{14}$
5	$9 * 10^{14}$

Табл. 1. Требуемые значения плотности плазмы для распространения различных продольных гармоник геликонной волны. Поле 0.27 Тл.

Однородный профиль плазмы.

Номер моды	Плотность, $\frac{1}{\text{см}^3}$
0	$2 * 10^{12}$
1	$9.2 * 10^{12}$
2	$2.2 * 10^{13}$
3	$4.1 * 10^{13}$
4	$6.7 * 10^{13}$
5	$1 * 10^{14}$
6	$3.1 * 10^{14}$
7	$4.1 * 10^{14}$
8	$5.3 * 10^{14}$
9	$6.6 * 10^{14}$

Табл. 2. Требуемые значения плотности плазмы для распространения различных продольных гармоник геликонной волны. Поле 0.03 Тл.

Однородный профиль плазмы.

Как видно из табл.1 и табл.2 при меньшем поле необходимы меньшие плотности. Так же примечательно то, что между нулевой и следующей модой

существенно большой разрыв по плотности. В дальнейшем этот факт может упростить фиксацию следующей гармоники.

Из расчетов становится ясным, что наиболее оптимальными параметрами для возбуждения геликонной волны, при заданной мощности источника, диаметре кварцевой трубки и др., являются:

1. Слабое магнитное поле (около 300 Гс)
2. Увеличение продольных размеров антенны (уменьшение  $k_z$ ) – следует из дисперсионного выражения.
3. Увеличение подводимой к антенне мощности – возможность генерации следующей продольной моды волны.

## 5. Результаты, полученные в ходе выполнения работы и их обсуждение.

В настоящее время на установке получена плазма. Ниже приведены графики отраженной и прошедшей мощности с высокочастотного генератора.

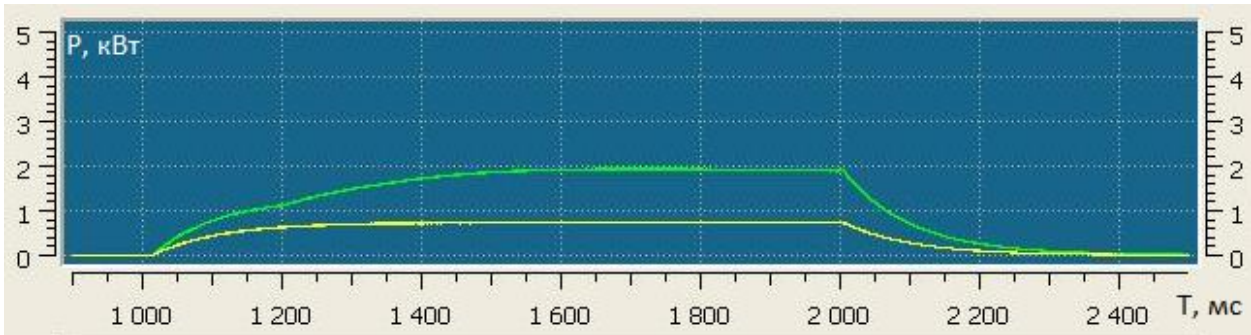


Рис.10 График отраженной и прошедшей мощностей на начальном этапе работы. Зеленым цветом отмечена прошедшая, желтым – отраженная. По оси X время (мс), по оси Y – мощность (кВт).

Как видно отраженная мощность достаточно большая, что говорит о несогласованности нагрузки в виде плазмы и антенны. После пересчета параметров согласующей схемы в программе NL5 и замены элементов в схеме было улучшено согласование, уменьшена отраженная мощность (см. рис. 11).

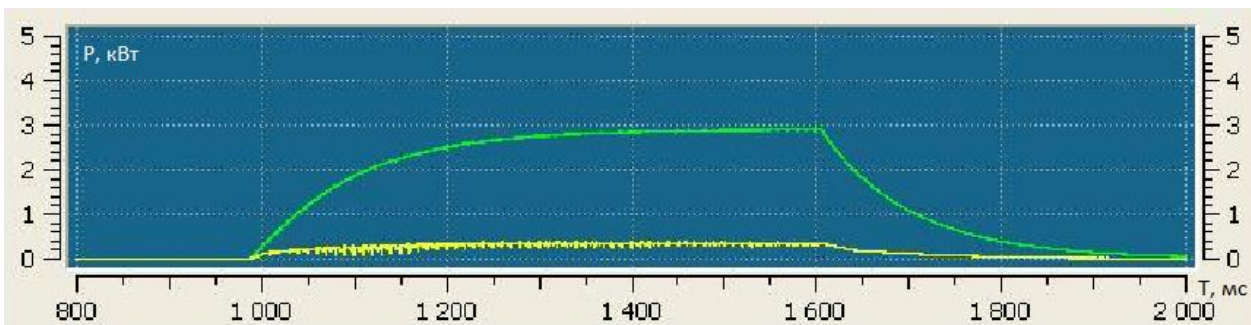


Рис.11 График отраженной и прошедшей мощностей после изменений в схеме. Зеленым цветом отмечена прошедшая, желтым – отраженная. По оси X время (мс), по оси Y – мощность (кВт).

Начиная с малых мощностей напряжение на антенне было постоянно - около 2 кВ (рис.12). Однако, в ходе проведения эксперимента был замечен перепад напряжения на антенне от 2 кВ до 3 кВ, при увеличении величины магнитного поля и обратно (рис.13) с резкими скачками плотности плазмы в центре. Что может быть интерпретировано как переходы между режимами разряда.

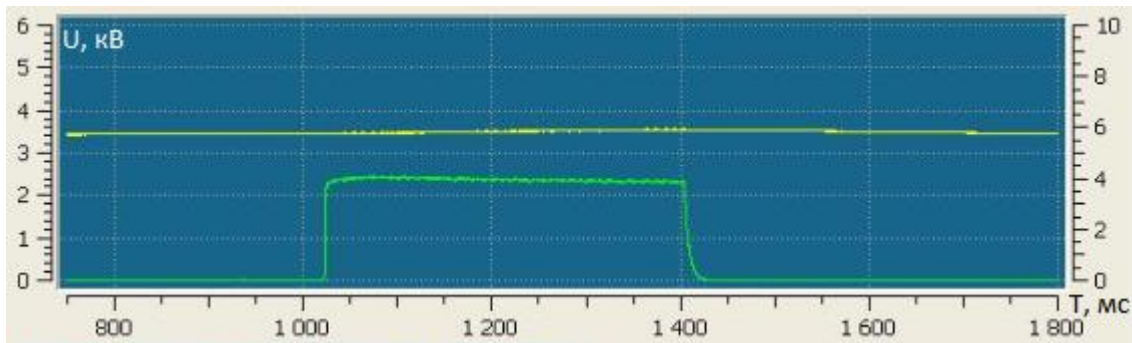


Рис.12 График напряжения на антенне (зеленый цвет). Желтым цветом показан сигнал с вакуумметра – давление в камере.

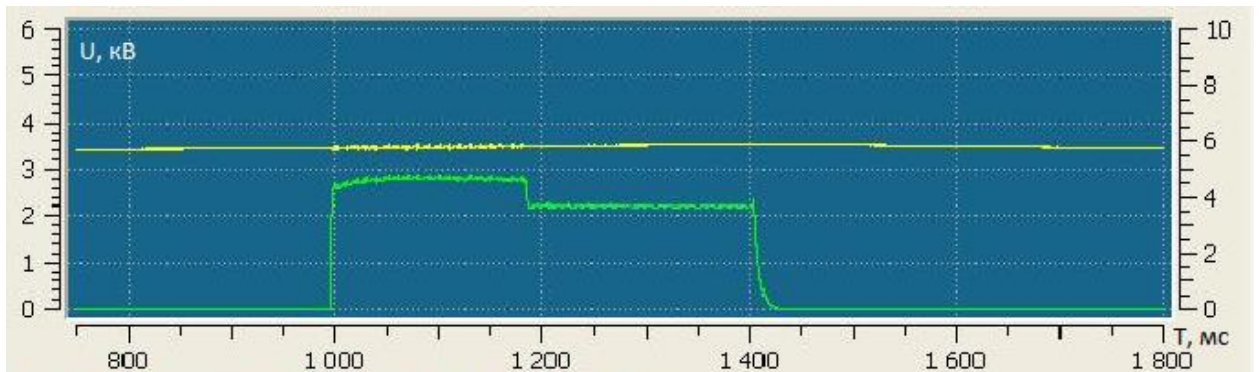


Рис.13 График напряжения на антенне (зеленый цвет). Перепад напряжения на антенне. Желтым цветом показан сигнал с вакуумметра – давление в камере.

С увеличением мощности генератора или величины магнитного поля напряжение на антенне перестает быть постоянным – возникает скачок, свидетельствующий о переходе в другой режим разряда, сопровождающийся резким увеличением плотности. Дальше с увеличением поля, напряжение вновь падает и становится постоянным. Профили плотности и температуры

плазмы, а так же зависимость плотности от величины магнитного поля были получена с помощью тройного ленгмюровского зонда. Напуск газа подобран наиболее оптимально для получение наибольшей плотности плазмы – при давлении 0,5 атм перед клапаном напуска газа. Мощность на выходе генератора 3.7 кВт.

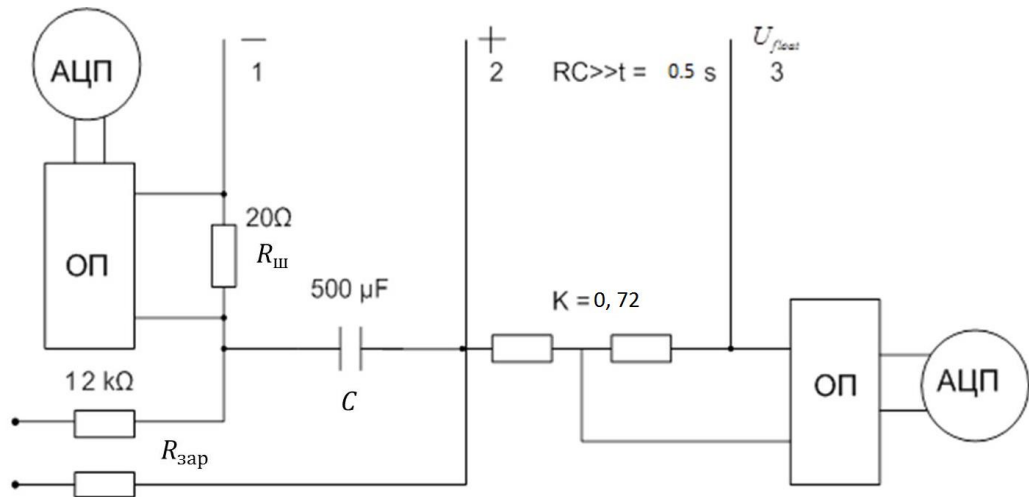


Рис.14. Устройство тройного зонда.

На рисунке 14 представлена схема тройного зонда, с помощью которого проводились измерения. Преимущество такой конструкции заключается в том, что можно одновременно измерять плотность и температуру довольно простым способом, не измеряя вольт-амперной характеристики зонда, вообще не меняя напряжений на электродах зонда. Однако же, тройной зонд работает корректно только при условии  $T_i = T_e$ .

Из рисунка 14 видно, что два зонда включаются по принципу двойного зонда. К тому же условия выбираются такими, чтобы двойной зонд работал в режиме насыщения ионного тока. Третий электрод является плавающим, т.е. ток на него равен нулю. Отрицательный электрод отталкивает все электроны, а все ионы – притягивает, таким образом, ток на него равен току ионного насыщения. Между парой электродов, образующих двойной зонд, прикладывается потенциал, много больший  $T_e/e$  ( $T_e$  – температура электронов,  $e$  – заряд электрона).

На электроде 2, потенциал которого ( $U_2$ ) по отношению к плазме также отрицателен, идет тоже ионный ток насыщения и вдвое больший электронный ток. При этом суммарный ток на оба электрода (1 и 2) равен нулю, как того требует уравнение непрерывности для стационарных условий. Измеряя напряжение между вторым и третьим электродами и ток ионного насыщения, можно найти локальную плотность и температуру плазмы. ОП – оптронный преобразователь для гальванической развязки. Конденсатор (С) заряжается до напряжения 100 В через зарядные сопротивления ( $R_{зар}$ ), величина которых выбирается такой, чтобы время разрядки конденсатора превышало время регистрации сигнала. В данном случае отдельный выстрел длится около 1 с, емкость конденсатора – 500 мкФ, величина зарядного сопротивления – 12 кОм. Регистрируется ионный ток, идущий на первый зонд, как напряжение на сопротивлении шунта, деленное на его величину ( $R_{ш}$ ). В схеме также используется делитель напряжения с коэффициентом деления  $k = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$ . Этот коэффициент учтен в обработке сигналов.

Зонд установлен в месте фланца для зондов – показано на рис.1.

На рисунке 15 приведена осциллограмма сигналов с зонда и показано установление тока насыщения с течением импульса (голубой цвет), а так же разница потенциалов (желтый) между вторым (положительным) и третьим (плавающим) электродами, отвечающая за локальную температуру плазмы.

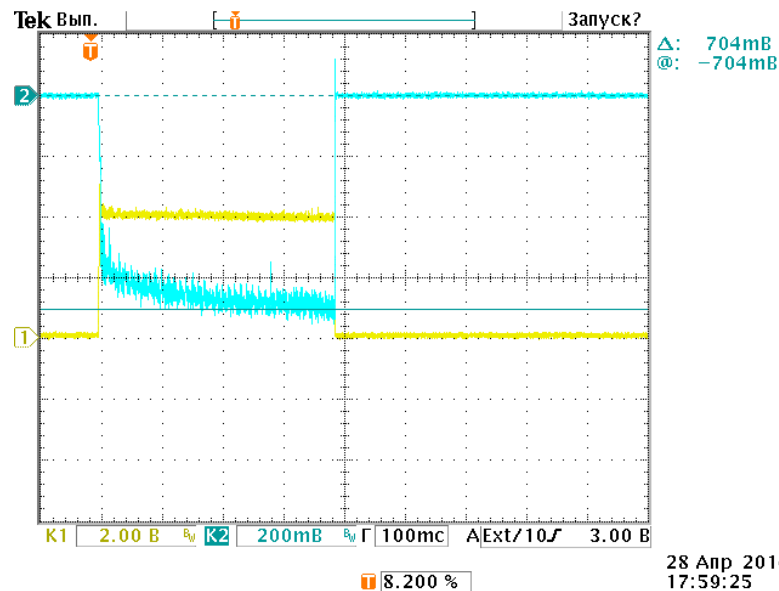


Рис.15. Осциллограммы (зависимость напряжения от времени) тока насыщения (голубой) и разности потенциалов между положительным и плавающим электродами (желтый).

Как видно из графиков, плотность максимальна в центре и падает к краю (рис.17). Температура же достигает максимума на радиусе 3 см, что свидетельствует о том, что в этом месте мощность наиболее эффективно поглощается плазмой (рис.18). Резкое увеличение плотности на рис.16 сопровождается скачком напряжения на антенне и согласно источнику [1] это и есть геликонный разряд. Скачок произошел при характерном поле 340 Гаусс в области антенны.

При мощности ниже 3 кВт, подобные скачки и переходы в геликонный режим не наблюдаются, т.к. мощности недостаточно.

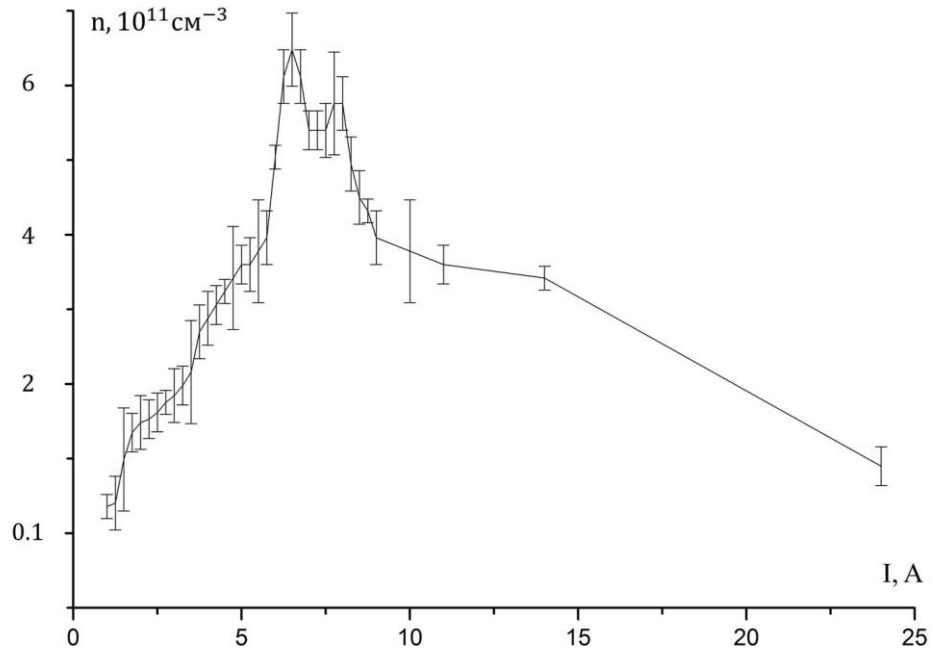


Рис.16 График зависимости плотности плазмы от тока в магнитных катушках

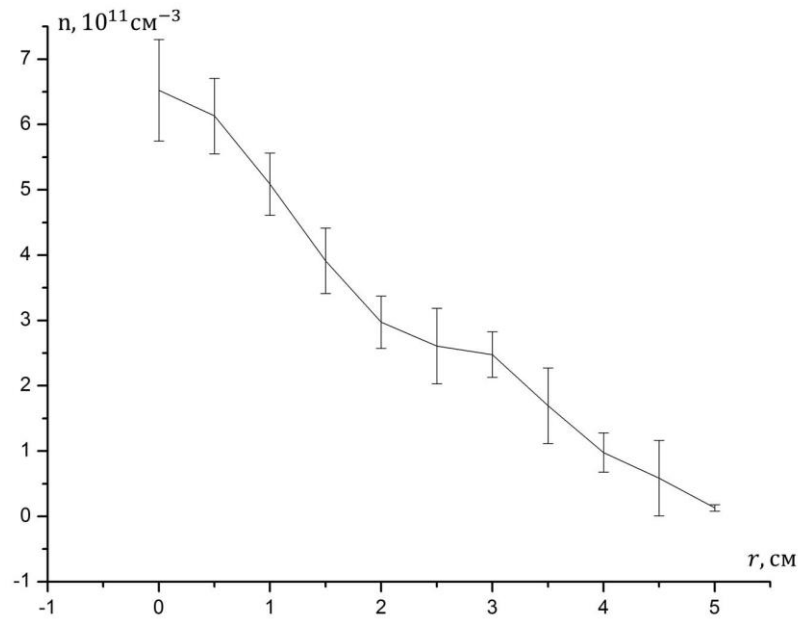


Рис.17 График профиля плотности плазмы.



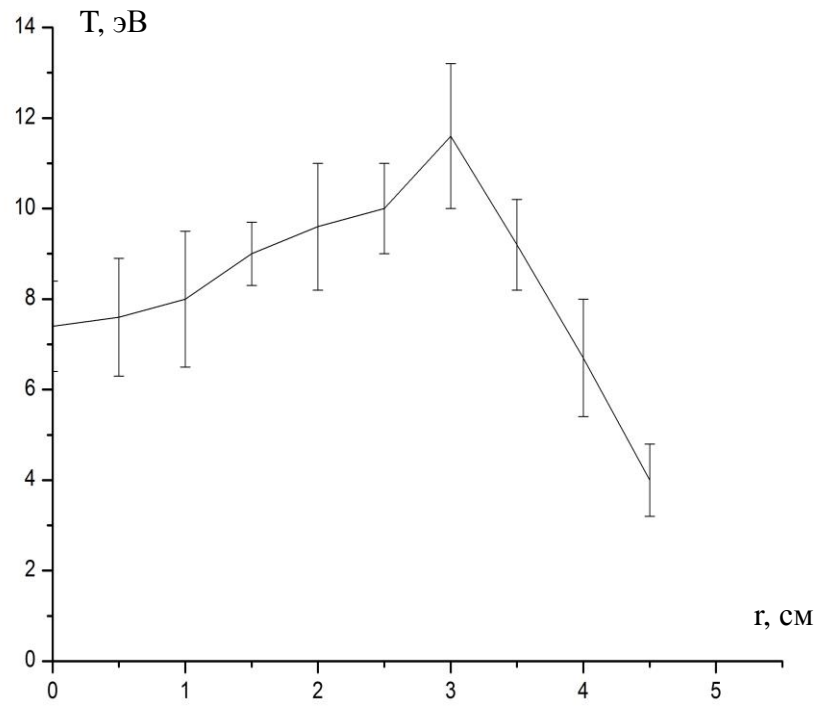


Рис.18 График профиля температуры плазмы.

## 6. Заключение.

В экспериментах на геликонном источнике были измерены температура и плотность плазмы с помощью тройного ленгмюровского зонда. Максимальная плотность в центре  $6.5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$  и падает ближе к краю кварцевой трубки. Температура имеет максимум на радиусе 3 см и находится в диапазоне от 7 до 12 эВ. Так же была изучена модель возникновения геликонных волн, посчитано при какой плотности возникает геликонный режим. Экспериментально этот режим произошел при меньшей плотности, что является следствием упрощения модели – например, однородности магнитного поля. Результаты показали, что данная тема является актуальной и имеют смысл дальнейшие работы (увеличение параметров генератора, длительности импульса и т.д.) с целью создания источника с более плотной и горячей плазмой.

## 7. Список литературы.

1. Physics of radio-frequency plasmas, Pascal Chabert Nicholas Braithwaite. Cambridge University Press, New York, 2011
2. O. V. Braginskii, A. N. Vasil'eva, and A. S. Kovalev, A Helicon Plasma Source // Russian Microelectronics, Vol. 29, No. 6, 2000, pp. 380–390
3. A.A. Ivanov, V.I. Davydenko, I.A. Kotelnikov, A.Kreter, V.V.Mishagin, I.A. Prokhorov, I.V. Shikhovtsev, B. Unterberg, High Efficiency Helicon Plasma Source for PMI Studies, Fusion Science and Technology / Volume 63 / Number 1T / May 2013 / Pages 217-220.
4. Давыденко В.И., Иванов А.А., Вайсен Г. Экспериментальные методы диагностики плазмы. Новосибирск 1999.
5. <http://fep.tti.sfedu.ru/books/conferenc/pem2000/pape1/ai46.pdf>
6. <http://www.ecobalance-don.ru/articles/article011.html>
7. <http://www.magazine-svet.ru/review/63804/>
8. [http://www.plasmatreat.ru/plasma-treatment/plasma-pretreatment/plasma-activation\\_surface-activation.html](http://www.plasmatreat.ru/plasma-treatment/plasma-pretreatment/plasma-activation_surface-activation.html)
9. F. F. Chen. Plasma Phys. Control. Fusion, 33(4):339–64, 1991