

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

Физический факультет

Кафедра общей физики

Морозов Олег Павлович

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Разработка зонда и измерение плотности и температуры плазмы в
геликонном источнике**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №20306

Научный руководитель:

_____ асп. Е.И. Кузьмин _____

Оценка научного руководителя

«_____» _____ 20__ г.

Преподаватель практикума

_____ д.ф.-м.н. О.Е. Терещенко _____

Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ 20__ г.

Куратор практикума:

_____ к.т.н. В.Т. Астрелин _____

Итоговая оценка

«_____» _____ 20__ г.

Новосибирск 2021

Аннотация

Данная работа посвящена исследованию зондовых методов диагностики плазмы ВЧ разряда во внешнем магнитном поле. В ходе выполнения работы был сконструирован и испытан тройной зонд Ленгмюра, и проведены эксперименты по измерению электронной температуры и плотности плазмы в зависимости от внешнего магнитного поля и напуска газа. Для указанных параметров получены радиальные профили. В работе описана конструкция, и приведены ограничения использования электрического зонда в рамках проводимого эксперимента. Получены значения электронной температуры ~ 8 эВ и ионной плотности $\sim 5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$, что согласуется с результатами СВЧ диагностики плазмы. Разработанная диагностика может быть использована для получения оптимальных параметров плазмы при проведении материаловедческих исследований по воздействию плазмы на материалы.

Ключевые слова: тройной зонд Ленгмюра, температура плазмы, плотность плазмы, геликонный ВЧ разряд, замагниченная плазма.

Оглавление

Введение.....	4
1. Описание экспериментальной установки.....	5
1.1 Схема геликонного источника.....	5
1.2 Схема тройного ленгмюровского зонда и описание диагностики.....	6
2. Теория.....	10
2.1 Виды ВЧ разряда в плазме.....	10
2.2 Ограничения теории зондов Ленгмюра.....	10
3. Экспериментальные данные и обсуждение результатов.....	12
3.1 Влияние значения магнитного поля на электронную температуру и плотность плазмы.....	12
3.2 Влияние направления магнитного поля на радиальный профиль электронной температуры и плотности.....	13
3.3 Влияние давления напуска газа на радиальный профиль электронной температуры и плотности.....	15
4. Заключение.....	17
5. Благодарности.....	17
6. Список литературы.....	18

Введение

В науке и промышленности в последнее время наблюдается развитие новых научно-технологических направлений, требующих улучшения существующих и создания новых методов обработки и анализа различных материалов. Нанесение покрытий, травление тонких пленок полупроводников, диэлектриков и металлов, а также материаловедческие исследования по воздействию плазмы на материалы требуют разработки источников плазмы с большими ионным потоком ($10^{20} - 10^{24} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$), способных работать в стационарном или квазистационарном режиме.

Геликонные источники высокочастотного разряда (ВЧ) разряда, как альтернатива дуговым источникам для материаловедческих исследований, становятся все более востребованными среди других плазменных источников. Одно из преимуществ ВЧ источников — отсутствие электродов, вносящих загрязнение в плазму и ограничивающих длительность работы источника. Поскольку в материаловедческих исследованиях необходимо знать поток частиц на исследуемую поверхность, требуется разработка методов измерения ионной плотности и температуры плазмы.

В работе используется метод диагностики измерения параметров плазмы тройным зондом Ленгмюра. Данный тип зонда позволяет проводить измерения температуры и плотности непрерывно во времени, без измерения ВАХ зонда, позволяя оперативно снимать показания плазмы в зависимости от изменения внешних параметров (магнитное поле, напуск газа, ВЧ мощность). Также метод зонда дает возможность построения пространственного распределения, которое в случае экспозиции потока на мишень играет ключевую роль.

1. Описание экспериментальной установки

1.1 Схема геликонного источника

Схема геликонного источника показана на рис. 1. Генерация плазмы происходит в газоразрядной кварцевой трубе 3. При подаче ВЧ напряжения на антенну 7 с генератора (рабочая частота – 13.56 МГц, мощность до 25 кВт) в камере возникает разряд, который инициируется поджигом 11 (вольфрамовая нить накала). Электроны, эмитируемые в камеру вольфрамовой нитью накаливания, под действием ВЧ поля ионизуют рабочий газ. Длительность генерации плазмы – 1 секунда, для исключения контакта плазмы со стенками камеры в установке предусмотрены лимитеры 5, 8. Плазма источника находится во внешнем магнитном поле, создаваемом системой катушек 2, 4[9].

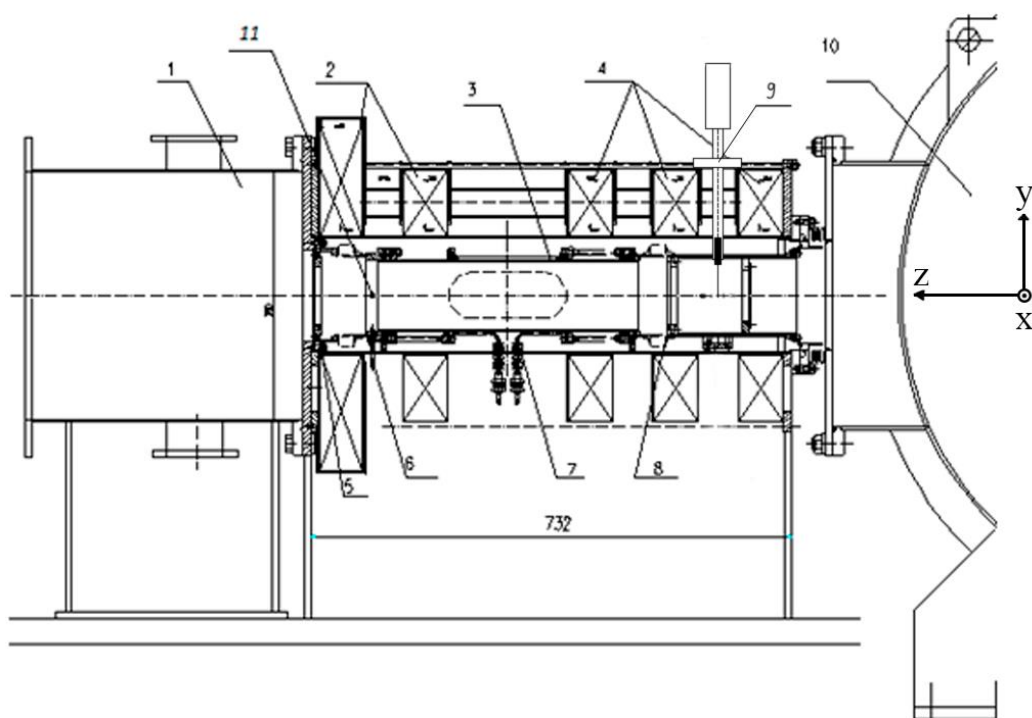


Рис. 1. Геликонный источник плазмы. 1 - расширительный объем; 2, 4 - катушки магнитного поля; 3 - кварцевая камера (длина 400 мм, внешний диаметр 108 мм, толщина стенки 2.5 мм); 5, 8 - лимитеры; 6 - импульсный клапан напуска газа; 7 – Геликонная ВЧ антенна (медная трубка $\varnothing 6$ мм, индуктивность – 0.3 мкГн, диаметр – 110 мм, длина – 160 мм); 9 – диагностический фланец, расстояние до центра разрядной камеры 36 см; 10 - вакуумный объем станда; 11 - поджиг.

Источник соединен с вакуумным объемом 10. Откачка газа осуществляется с помощью форвакуумного и турбомолекулярного насосов. Рабочий газ (H_2) в кварцевую камеру подается с импульсного клапана 6. Рабочее давление вакуума в камере — $3 \cdot 10^{-6}$ Торр, давление газа в момент разряда ~ 20 мТорр.

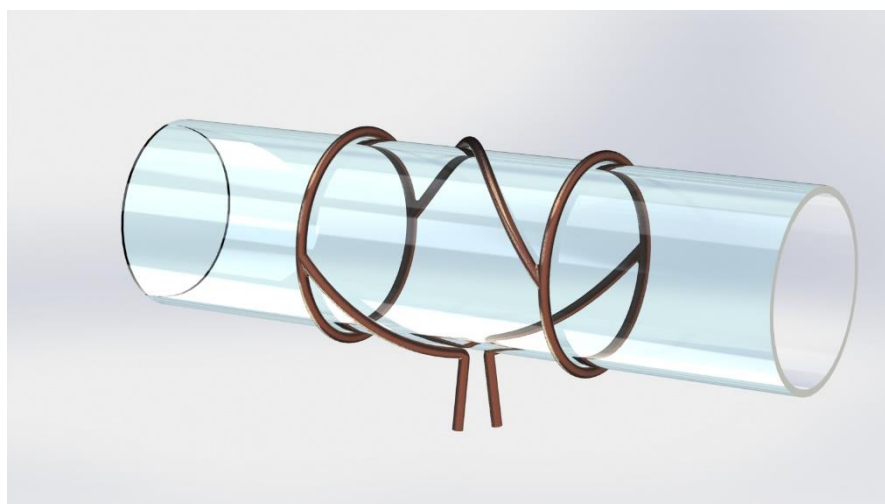


Рис. 2. Геликонная ВЧ антенна

Для создания плазмы в эксперименте использована Геликонная полуволновая ВЧ антенна (рис. 2) с азимутально несимметричными выводами.

1.2 Схема тройного ленгмюровского зонда и описание диагностики

Для измерения электронной температуры и плотности плазмы использовался тройной ленгмюровский зонд, установленный на диагностическом фланце 9 (рис. 1). Схема зонда приведена на рис. 3. Тройные ленгмюровские зонды часто используются при измерении электронной температуры и плотности плазмы. Преимуществом таких зондов является возможность получать одновременно и непрерывно во времени указанные величины, не меняя напряжение электродов и не измеряя вольт-амперную характеристику зонда, что верно при $T_e \gg T_i$ и для низкотемпературной плазмы справедливо почти всегда.

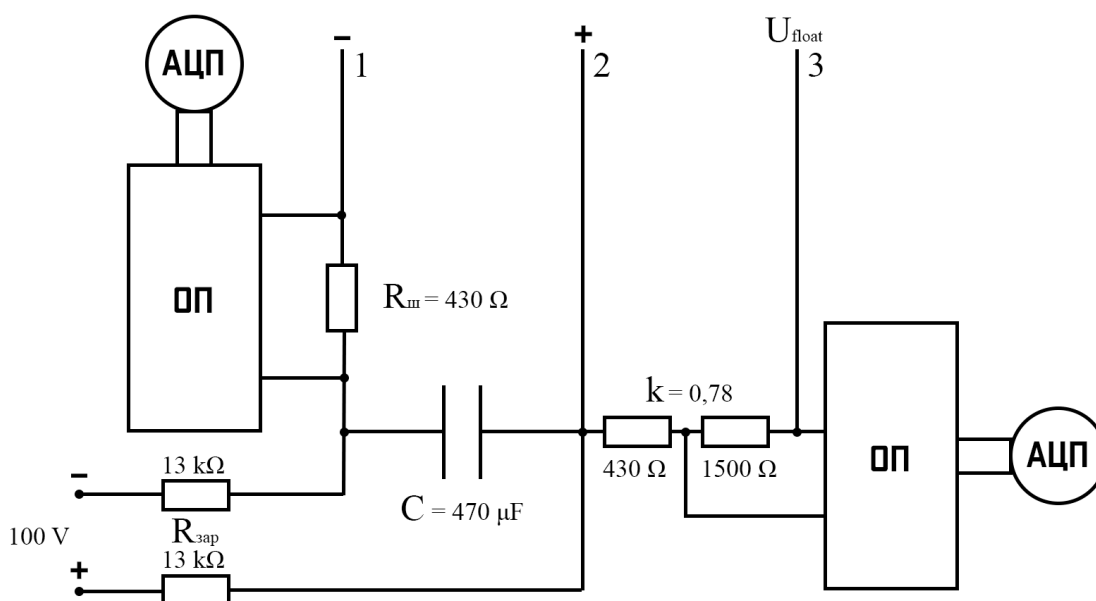


Рис. 3. Измерительная схема тройного ленгмюровского зонда.

Тройной зонд состоит из трех электродов, два из которых (1 и 2) подключены по схеме двойного ленгмюровского зонда, находящегося в режиме насыщения ионного тока. Для наглядности ВАХ одиночного зонда приведена на рис. 4. Между электродами 1 и 2 прикладывается потенциал много больший $\frac{T_e}{e}$. На электрод 1 подается отрицательное напряжение ($U_1 = 100$ В), таким образом, он отталкивает все электроны и тепловой ток на него равен ионному току насыщения. На электрод 2, потенциал которого по отношению к плазме также отрицателен (U_2), поступает ионный ток насыщения и вдвое больший электронный ток, так что суммарный ток на него равен току ионного насыщения, но с противоположным знаком. Электрод 3 является плавающим (U_{float}), суммарный ток на него равен нулю, тогда ток электронов равен по абсолютной величине току ионного насыщения.

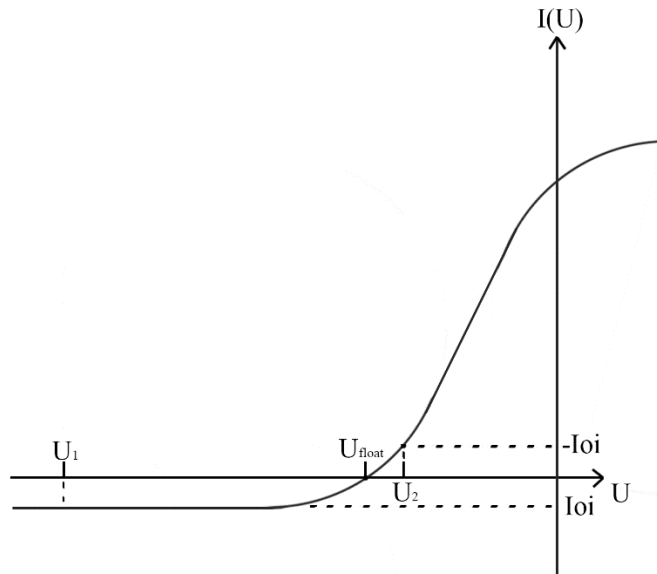


Рис. 4. ВАХ одиночного зонда.

В результате суммарный ток на электроды 1, 2 равен нулю как того требует уравнение непрерывности для стационарных условий [2]:

$$2 \frac{en}{4} \langle V_i \rangle = \frac{en}{4} \langle V_e \rangle e^{-\frac{eU_2}{T_e}}$$

$$\frac{en}{4} \langle V_i \rangle = \frac{en}{4} \langle V_e \rangle e^{-\frac{eU_3}{T_e}}$$

Здесь зависимость тока на зонд от напряжения определяется формулой Дрювестейна [1]. Измеряя напряжение между электродами 2 и 3, можно найти электронную температуру по формуле [2]:

$$T_e = \frac{e(U_2 - U_3)}{\ln 2} \quad (1)$$

Зная электронную температуру и ионный ток насыщения двойного зонда можно найти плотность плазмы по формуле [1]:

$$n = \frac{2I_i}{Se} \sqrt{\frac{\pi m_i}{2eT_e}} \quad (2)$$

ОП – оптронный преобразователь (рис. 3) - выполняющий роль гальванической развязки, используется для фильтрации наводок, вызванных колебаниями потенциала плазмы. Конденсатор (С) заряжается до напряжения 100 В через зарядные сопротивления ($R_{зар}$), величина которых выбирается такой, чтобы время разрядки конденсатора было больше времени регистрации сигнала. В данном эксперименте длительность генерации плазмы 1 с, $C=500$ мкФ, $R_{зар}=13$ кОм. Измеряемый ионный ток насыщения, идущий на первый зонд, - напряжение на сопротивлении шунта, деленное на его величину ($R_{ш}$). В схеме использовался делитель для напряжения между электродами 2 и 3 с коэффициентом деления:

$$k = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Формулу 2 можно переписать для случая цилиндрического зонда, конструкция которого приведена на рис. 5, где R – радиус электрода (0,1 мм), l – длина вольфрамовой нити (2,3 мм):

$$n = \frac{2I_i}{(\pi R^2 + 2\pi Rl)e} \sqrt{\frac{\pi m_i}{2eT_e}}$$

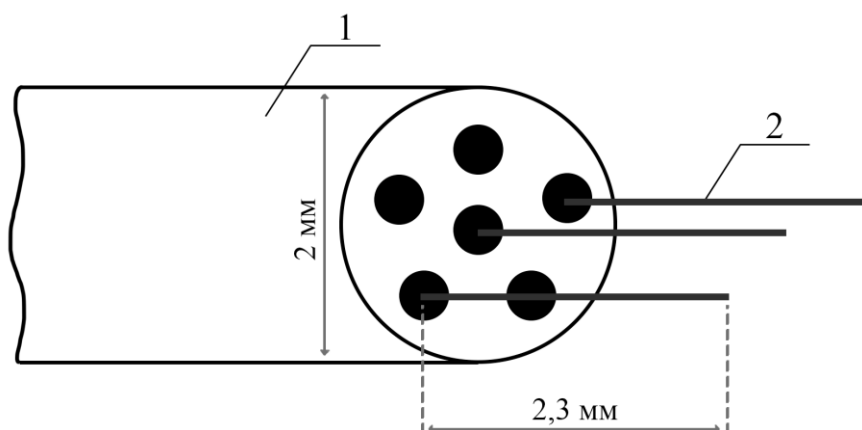


Рис. 5. Конструкция тройного зонда: 1 – керамическая трубка $\varnothing 2$ мм, 2 – электроды $\varnothing 0,2$ мм, $l = 2,3$ мм.

2. Теория

2.1 Виды ВЧ разряда в плазме

В зависимости от параметров генерации плазмы в ВЧ источнике системы (и наличия внешнего магнитного поля) различают три основных типа ВЧ разрядов: емкостной, индукционный и волновой. В емкостном разряде ионизация частиц происходит за счет ускорения ионов ВЧ напряжением между обкладками ВЧ антенны, при этом разряд характеризуется низкой плотностью ($10^9 - 10^{10} \text{ см}^{-3}$ [5]). В индукционном разряде ионизация происходит в тонком пристеночном слое (на длине скин-слоя) вихревым электрическим полем, порождаемым током антенны, ионизация плазмы в разряде выше, чем в емкостном (10^{11} см^{-3}).

Постоянное магнитное поле позволяет распространяться электромагнитным волнам на низких частотах $\omega \ll \omega_p$, где ω_p – плазменная частота, примером таких волн являются «геликоны». Слово геликон было впервые предложено французским ученым Эгреном для описания электромагнитной волны, распространяющейся в плазме свободных электронов внутри твердого металла. В 1970 году Босвелл предложил использовать их в качестве источника энергии для поддержания плазмы. Название «геликон» происходит от того факта, что волна вращается во время своего распространения в z-направлении, перемещая электроны по спирали. Электрическое и магнитное поля волны имеют следующий вид[6]:

$$E, B \sim e^{j(\omega t - k_z z - m\varphi)}$$

где m – номер азимутальной моды, k_z – продольное волновое число, φ – азимутальный угол. Распространение волн в плазме означает, что поглощение энергии происходит во всем объеме плазмы в отличие от индукционного или емкостного разряда, обеспечивая высокую эффективность ионизации в больших объемах плазмы.

2.2 Ограничения теории зондов Ленгмюра

Требование малости возмущения, вызванного зондом при погружении в плазму, является необходимым условием для использования приведенного

метода. На рис. 6 схематично показаны основные геометрические параметры, накладывающие ограничение на использование зонда. Зондовый слой (r_s) – слой пространственного заряда у поверхности зонда. В области за его пределами считаем, что поле зонда отсутствует, а плазма квазинейтральна $n_i \approx n_e$. Типичные размеры слоя порядка нескольких дебаевских радиусов [1]:

$$r_D \cong 750 \cdot \sqrt{\frac{T(\text{эВ})}{n(\text{см}^{-3})}} \quad (3)$$

где T – электронная температура, n – плотность плазмы. Плазму считаем неограниченной, что почти всегда выполнимо, характерный размер зонда (радиус) – R , длина свободного пробега электрона или иона – λ .

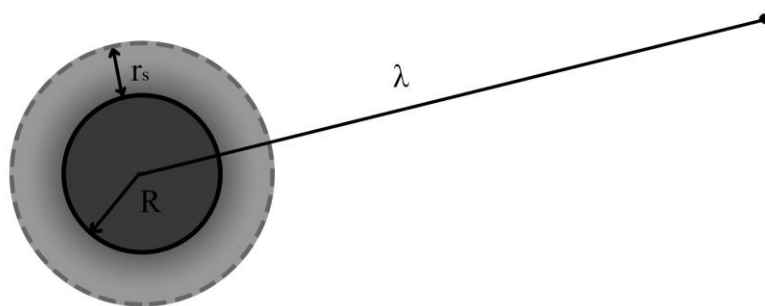


Рис. 6. Схематическое изображение основных геометрических параметров.

Ограничения, накладываемые на использование зондового метода измерений, описываются тремя неравенствами [1, 4]:

$$\lambda \gg R \quad (4)$$

$$\lambda \gg r_s \quad (5)$$

$$R \gg r_s \quad (6)$$

Неравенство (4) – критерий малости возмущения плазмы зондом, (5) – требование отсутствия столкновений в зондовом слое. Условие (6) является дополнительным, чтобы можно пренебречь дополнительной собирающей поверхностью, образованной за счет зондового слоя.

Влияние магнитного поля на характер столкновения заряженных частиц сказывается слабо, если дебаевский радиус меньше среднего ларморовского радиуса частицы:

$$r_D < \frac{m_e v_e c}{eH} \quad (7)$$

Воспользуемся формулой (3) и сделаем оценку для следующих параметров плазмы $n = 5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$, $T_e = 10 \text{ Эв}$ в магнитном поле $H = 120 \text{ Гс}$. Получим $r_D \cong 10^{-3} \text{ см} < 10^{-1} \text{ см}$, следовательно условие (7) выполнено.

3. Экспериментальные данные и обсуждение результатов

3.1 Влияние значения магнитного поля на электронную температуру и плотность плазмы

На первой стадии эксперимента было изучено влияние на плазму магнитного поля, создаваемого катушками. Измерялись электронная температура и плотность плазмы для магнитного поля 49-390 Гс. При этом статистическая погрешность измерений равна 12%. Полученные данные представлены на рис. 7 и 8. С увеличением магнитного поля температура падает, а плотность достигает своего максимума ($3,9 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$) на интервале 50-120 Гс после чего падает с увеличением магнитного поля.

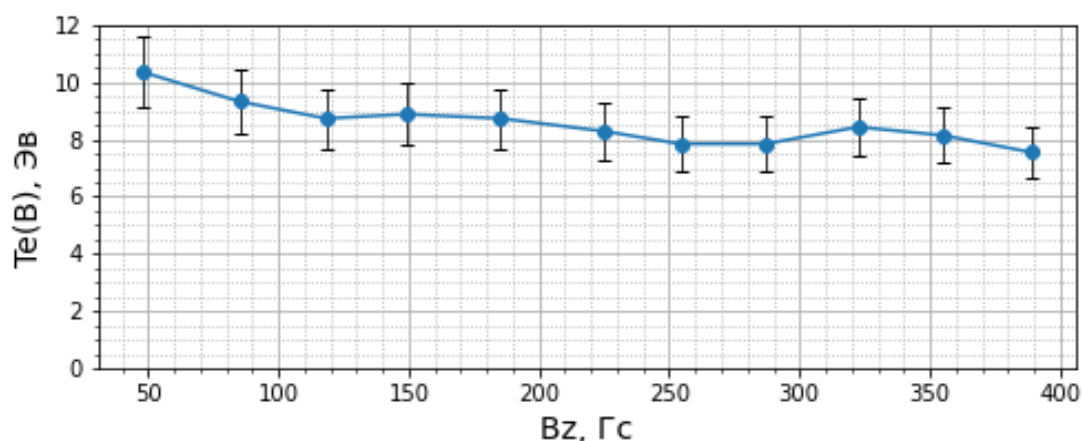


Рис. 7. Зависимость электронной температуры от магнитного поля катушек.

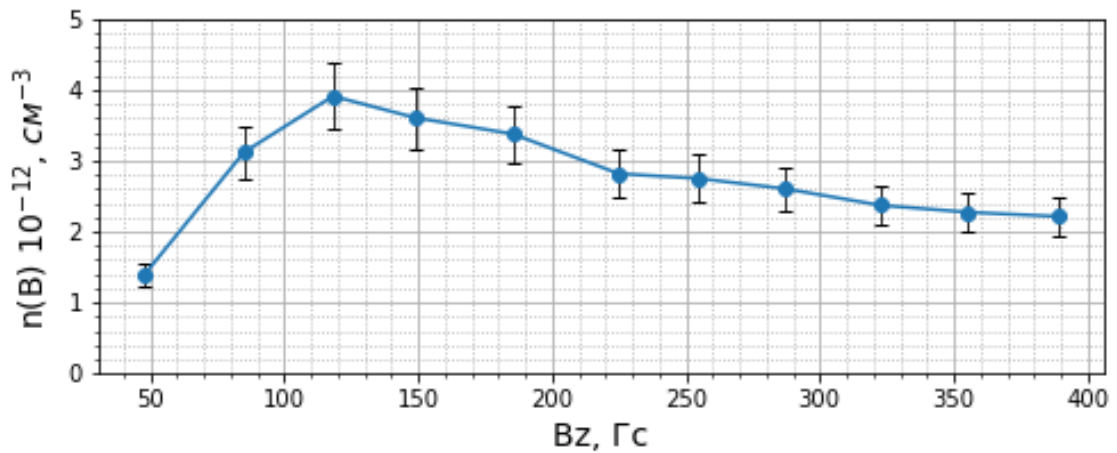


Рис. 8. Зависимость плотности от магнитного поля катушек.

3.2 Влияние направления магнитного поля на радиальный профиль электронной температуры и плотности.

Для найденного оптимального поля (120 Гс) далее были проведены измерения радиальных профилей электронной температуры и плотности. Поскольку в геликонном источнике ионизация происходит за счет передачи энергии электронам геликонными волнами, которые являются продольными электромагнитными волнами, использование азимутально-несимметричных антенн позволяет распространяться волнам с правой и левой поляризацией, при этом поляризация зависит от направления магнитного поля в источнике.

Для магнитного поля 120 Гс, был измерен профиль электронной температуры и плотности плазмы вдоль вертикальной оси, для различных направлений магнитного поля. Полученные данные представлены на рис. 9 и 10. Здесь положительное магнитное поле соответствует распространению в направлении зонда моды $m=1$, а отрицательное — моде $m=-1$.

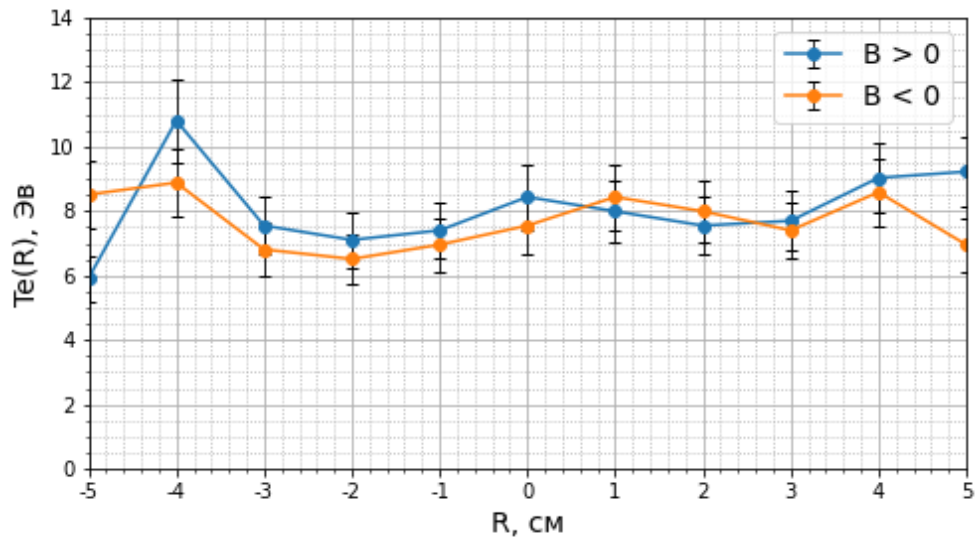


Рис. 9. Зависимость электронной температуры от расстояния до центра источника при различных направлениях магнитного поля.

Изменение магнитного поля оказывает слабое влияние на распределение электронной температуры, однако существенно влияет на плотность плазмы.

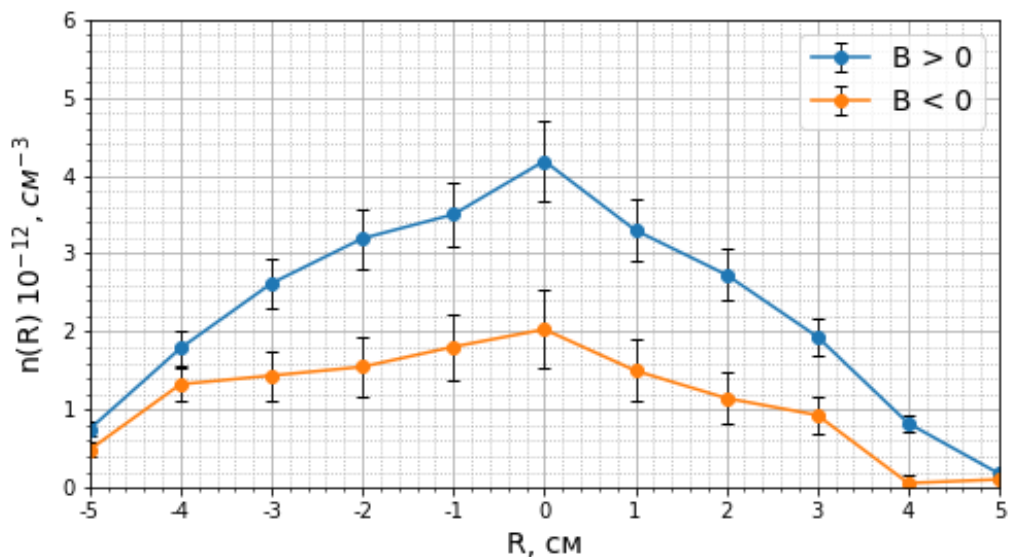


Рис. 10. Зависимость плотности плазмы от расстояния до центра источника при различных направлениях магнитного поля.

Пиковое значение плотности плазмы (при $R = 0$) уменьшается более чем в два раза для случая $B < 0$, а спад плотности с расстоянием становится не таким резким, как в первом случае. Данный факт полностью совпадает с теорией распространения геликонных волн в плазме, поскольку $m = -1$ мода быстро затухает, а следовательно хуже передает энергию в плазму [8]. Все дальнейшие

измерения проводились при $V > 0$, поскольку предпочтительной является высокая плотность плазмы.

3.3 Влияние давления напуска газа на радиальный профиль электронной температуры и плотности.

При значении магнитного поля (120 Гс), его начальном направлении и при значениях давления напуска газа: 21,2 мТорр, 37,6 мТорр были проведены измерения профиля электронной температуры и плотности плазмы. Полученные данные представлены на рис. 11 и 12.

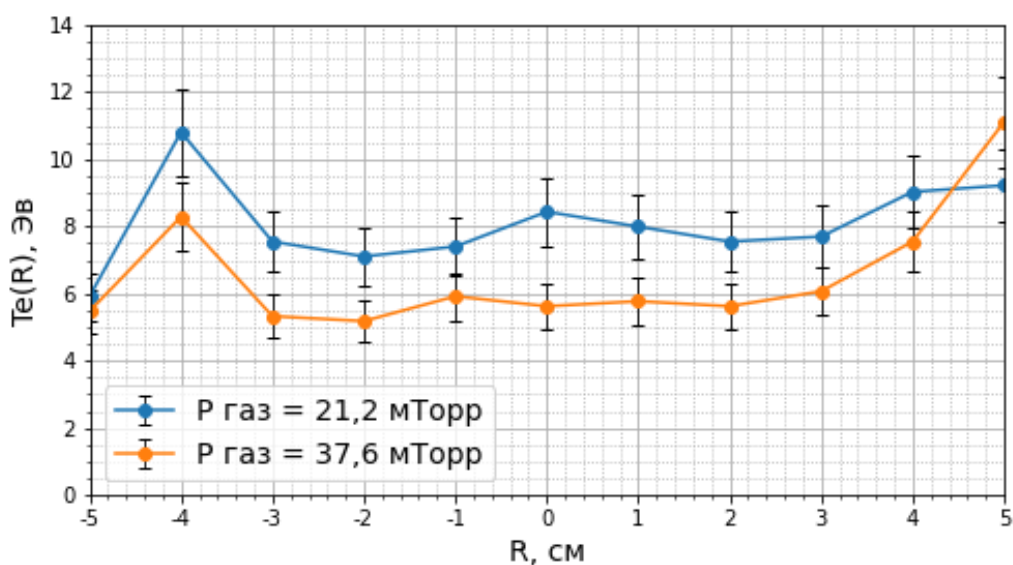


Рис. 11. Зависимость электронной температуры от расстояния до центра источника при различных давлениях напуска газа.

Профиль, полученный при давлении газа 37,6 мТорр отличается меньшими значениями температуры, но практически полностью повторяет профиль при давлении газа 21,2 мТорр.

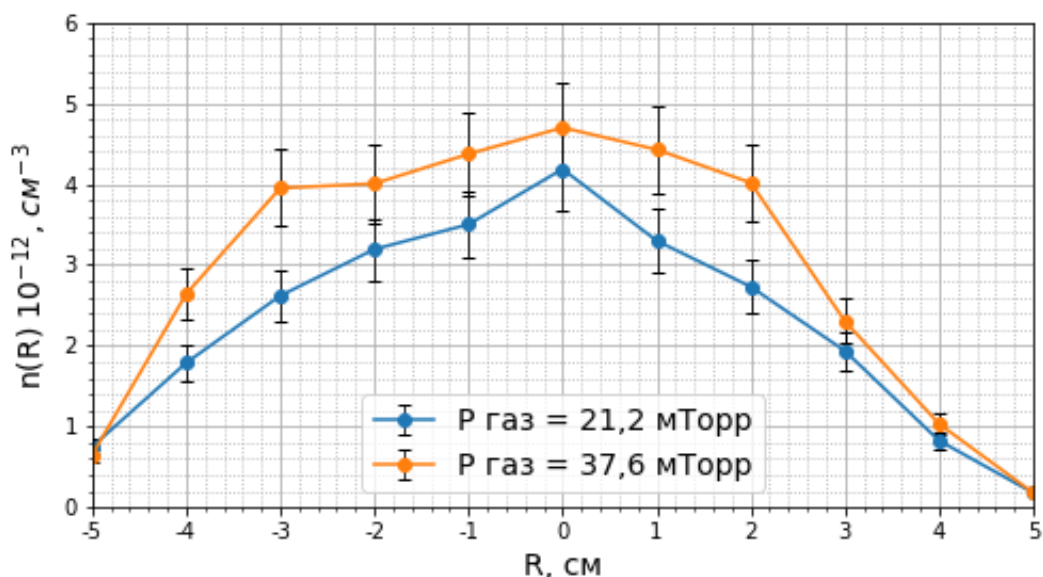


Рис. 12. Зависимость плотности плазмы от расстояния до центра источника при различных давлениях напуска газа.

Для профиля при давлении газа в 37,6 мТорр значения плотности в интервале от -2 до 2 см спадают медленнее, чем для давления в 21,2 мТорр, вне этого интервала оба рассмотренных профиля ведут себя похожим образом.

Слабое изменение плотности плазмы вблизи оси, которое наблюдается при давлении 37,6 мТорр, может быть использована в материаловедческих исследованиях по воздействию плазмы на материалы, в которых необходим большой ионный поток, который будет равномерно действовать на поверхность измеряемого образца, что обеспечивается равномерностью температуры и плотности. В данном случае ионный поток на площадку радиусом 2 см равен $\sim 10^{20} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, что как раз и является нижней границей ионного потока, необходимого для проведения подобных исследований.

4. Заключение

В ходе выполнения работы был сконструирован и испытан тройной зонд Ленгмюра, и проведены эксперименты по измерению электронной температуры и плотности плазмы в зависимости от внешнего магнитного поля и напуска газа. Для различных направлений магнитного поля и давления напуска газа были сняты радиальные профили температуры и плотности. Измеренные значения плотности $\sim 5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ находятся в соответствии с результатами по измерению плотности плазмы методом СВЧ отсечки, а также с результатами, полученными на других геликонных установках при схожих параметрах [7]. Кроме того, поведение профиля плотности в зависимости от направления внешнего магнитного поля позволяют косвенно подтвердить существование в плазме геликонного разряда, что является более простым способом детектирования волн по сравнению с использованием магнитных зондов. Полученные результаты предлагается использовать в ходе подбора оптимальных параметров плазмы для проведения материаловедческих исследований по воздействию плазмы на материалы.

5. Благодарности

Автор благодарит научного руководителя асп. Кузьмина Евгения Игоревича за помощь в изучении теоретических и экспериментальных основ по данной теме.

6. Список литературы

- [1] Давыденко В. И., Иванов А. А., Вайсен Г. Экспериментальные методы исследования плазмы, 1999.
- [2] Иванов А. А., Багрянский П. А., Бочаров В. Н. Диагностический комплекс установки ГДЛ для изучения нагрева плазмы при инжекции мощных атомарных пучков, 1993.
- [3] Kralkina E. и др. Power absorption, plasma parameters and wave structure in inductive RF plasma source with low value external magnetic field // Plasma Sci. Technol. 2020. Т. 22. № 11.
- [4] Демидов В. И., Кудрявцев А. А., Колоколов Н. Б. Зондовые методы исследования низкотемпературной плазмы, 1996.
- [5] Lafleur T. A. Helicon Wave Propagation in Low Diverging Magnetic Fields // Phys. Plasmas. 2011.
- [6] Chabert P., Braithwaite N. Physics of radio-frequency plasmas. , 2011.
- [7] Blackwell B. D. и др. Design and characterization of the Magnetized Plasma Interaction Experiment (MAGPIE): A new source for plasma-material interaction studies // Plasma Sources Sci. Technol. 2012. Т. 21. № 5.
- [8] Miljak D. G., Chen F. F. Helicon wave excitation with rotating antenna fields // Plasma Sources Sci. Technol. 1998. Т. 7. № 1. С. 61–74.
- [9] Кузьмин Е. И. Исследование параметров геликонного источника плазмы // 2016. С. 4 – 5.