

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ» (НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ, НГУ)

Факультет **ФИЗИЧЕСКИЙ**

Кафедра Физики плазмы

Направление подготовки **03.03.02 ФИЗИКА**

Образовательная программа: **БАКАЛАВРИАТ**

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

Глинского Владимира Владимировича

(Фамилия, Имя, Отчество автора)

Тема работы Измерение локальных параметров плазмы в установке СМОЛА зондовыми методами

«К защите допущена»

Заведующий кафедрой

д-р физ.-мат. наук, профессор

ИЯФ СО РАН

Иванов А. А./.....
(фамилия И., О.) / (подпись, МП)

«.....».....2019г.

Научный руководитель

к. ф.-м.н., доцент

ИЯФ СО РАН

Иванов И. А./.....
(фамилия И., О.) / (подпись, МП)

«.....».....2019г.

Дата защиты: «.....».....2019г.

Новосибирск, 2019

Оглавление

| | |
|--|--|
| 1. Введение..... | 3 |
| 2. Установка СМОЛА | 4 |
| 3. Зонды | 6 |
| 3.1 Одиночный зонд..... | 6 |
| 3.1.1 ВАХ одиночного зонда | 8 |
| 3.1.2 Определение n_0 и T_e | 10 |
| 3.2 Тройной зонд | 10 |
| 3.3 Эмиссионный зонд..... | 13 |
| 4. Реализация зондов..... | 14 |
| 5. Измерение параметров плазмы..... | 16 |
| 5.1 Проверка работы тройного зонда..... | 17 |
| 5.2 Распределение температуры и плотности электронов плазмы вдоль ее диаметра..... | 21 |
| 6. Выводы | 22 |
| 7. Литература | 23 |
| 8. Приложение | Ошибка! Закладка не определена. |
| 8.1 Конструкция эмиссионного зонда..... | 24 |
| 8.2 Работа эмиссионного зонда | 25 |

1. Введение

Сегодня наиболее простыми в инженерном плане установками для удержания горячей плазмы являются магнитные ловушки открытого типа. Основная их проблема заключается в том, что плазма вытекает с торцов данных ловушек. Одним из способов, позволяющим уменьшить эти потери, является создание движущихся магнитных пробок на концах ловушки, которые бы закачивали часть плазмы обратно в рабочий объем. Однако формирование изменяющегося во времени магнитного поля, которое бы создавало движущиеся магнитные пробки в лабораторной системе отчета, очень энергозатратно. Поэтому была разработана концепция удержания плазмы винтовым магнитным полем, чью работоспособность должна проверить установка СМОЛА [1].

Концепция состоит в создании винтового магнитного и радиального электрического полей, благодаря которым плазма на торцах ловушки начинает вращаться из-за $E \times B$ дрейфа. Конфигурация установки, которая использует данную концепцию, приведена на рис. 1. Установка состоит из основной зоны удержания, двух транспортных секций, в которых создается винтовое магнитное и радиальное электрическое поля и расширителей. Конфигурация установки без транспортных секций полностью повторяет конфигурацию открытой ловушки.

В системе отчета вращающиеся плазмы вдоль нее движутся магнитные пробки, тем самым либо закачивая ее в зону удержания, либо откачивая из нее, в зависимости от направления магнитного и электрического полей.

Чтобы посмотреть эффективность удержания плазмы в установке СМОЛА, нужно измерять ее параметры во время эксперимента. Такие параметры, как температура и плотность электронов плазмы, ее потенциал можно измерять, используя тройной, одиночный и эмиссионный зонды.

Целью данной работы является получение радиального профиля температуры и плотности электронов плазмы в установке СМОЛА с помощью зондов.

Работа построена следующим образом: сначала описывается установка СМОЛА, потом излагается зондовая теория и рассказывается про реализацию зондов на данной установке, после чего приводятся результаты измерения параметров, полученных благодаря зондам.

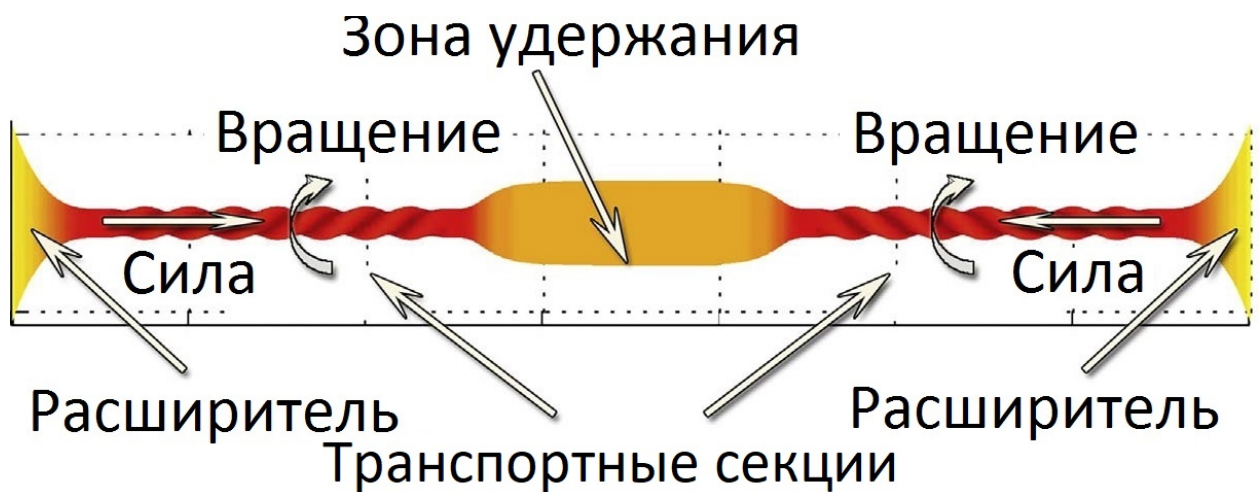


Рис. 1. Примерная конфигурация установки, использующей концепцию винтового удержания.

2. Установка СМОЛА

Установка СМОЛА, представленная на рис. 2, состоит из плазменной пушки, двух расширителей и транспортной секции. Вакуум в данной установке поддерживается двумя турбомолекулярными насосами, удерживающее плазму прямое поле (параллельное оси установки) создается катушками плазменной пушки, катушками расширителей и прямыми катушками транспортной секции.

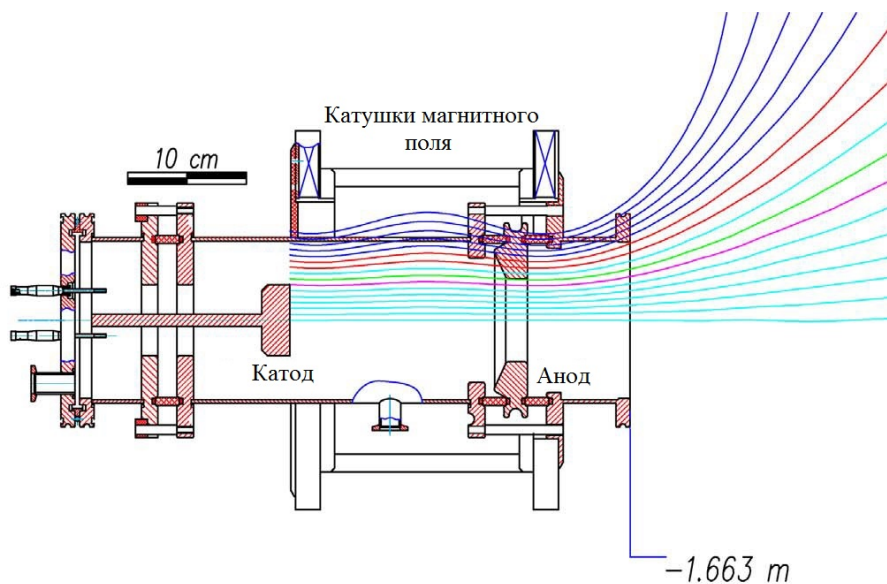
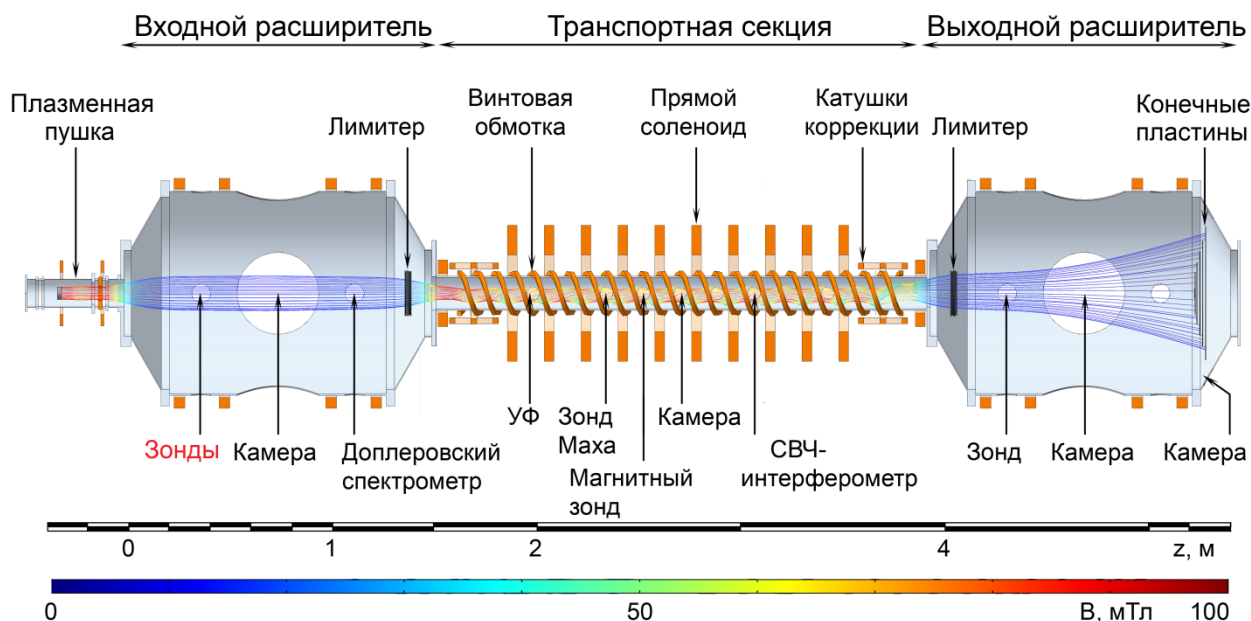


Рис. 2. Установка СМОЛА и плазменная пушка. Разноцветными линиями обозначены линии магнитного поля, используемые в данной работе зонды находятся во входном расширителе.

Необходимое для вращения плазмы радиальное магнитное поле создается намотанными под углом проводниками в транспортной секции. А радиальное электрическое поле может создаваться путем приложения напряжения между катодом пушки и конечными пластинами (конечные пластины представляют собой 5 изолированных друг от друга и от земли кольца).

Нужно заметить, что, как видно из рис. 2, некоторые магнитные линии проходят через анод, а значит, учитывая, что плазма имеет высокую проводимость, во входном расширителе, и, как следствие, в транспортной секции будет наблюдаться радиальное изменение электрического потенциала, т.е. будет наблюдаться радиальное электрическое поле (т.к. одна часть плазмы касается катода, а другая-анода). Таким образом, плазма будет вращаться без приложения напряжения между анодом и конечными пластинами, именно поэтому в проведенных для измерения параметров плазмы экспериментах (результаты которых представлены в разделе 5) на конечные пластины не подавался потенциал.

Более подробно об установке СМОЛА написано в [1].

3. Зонды

Ниже рассмотрены принципы работы одиночного [2], тройного [3] и эмиссионного [5] зондов для водородной плазмы.

Сделаем следующие предположения:

1. Электроны и ионы в плазме имеют Максвелловское распределение.
2. Средние длины пробега электронов и ионов \gg характерного размера зондов.
3. T_e (температура электронов) $\gg T_i$ (температура ионов).
4. λ_D (длина Дебая) \ll характерного размера зондов.

Т.к. при погружении в плазму проволоки под потенциалом (зонда) вокруг нее создается область пространственного заряда порядка λ_D , то последнее предположение означает, что зонды можно считать плоскими.

3.1 Одиночный зонд

Одиночный зонд представляет собой металл, помещенный в плазму. Будем рассматривать плоский одиночный зонд, изображенный на рис. 3. Для определенности до раздела 3.1.1 будем считать потенциал данного зонда отрицательным относительно плазмы.

При нахождении зонда в плазме, плазма вокруг него возбуждается. Можно выделить две области возбужденной плазмы: область пространственного заряда (при отрицательном потенциале зонда данная область имеет положительную плотность заряда), которая находится непосредственно возле зонда и квазинейтральную область (не имеющая пространственного заряда область, но имеющая электрическое поле, создаваемое зондом и областью пространственного заряда), находящуюся за областью пространственного заряда. За квазинейтральной областью располагается невозмущенная плазма.

В дальнейшем потребуется плотность тока электронов j_e и ионов j_i на зонд. Т.к. электроны в плазме подчиняются Максвелловскому распределению, то плотность электронов у поверхности зонда по закону Больцмана равна

$$n_e = n_0 \exp\left(\frac{e(V_p - V_{plasma})}{kT_e}\right), \quad (1)$$

где n_0 -плотность электронов невозмущенной плазмы, k -постоянная Больцмана, T_e -температура электронов, e -заряд электрона по модулю, V_p -потенциал зонда, V_{plasma} -потенциал плазмы. Тогда, с учетом того, что тепловая скорость электронов

$$\bar{v}_e = \left(\frac{8kT_e}{\pi m_e}\right)^{1/2}, \quad (2)$$

где m_e -масса электрона, плотность тока электронов на зонд равна

$$j_e = -\frac{en_e \bar{v}_e}{4} = -\frac{en_0}{4} \exp\left(\frac{e(V_p - V_{plasma})}{kT_e}\right) \left(\frac{8kT_e}{\pi m_e}\right)^{1/2}. \quad (3)$$

Чтобы найти плотность тока ионов на зонд j_i , нужно учесть что квазинейтральная область своим полем ускоряет ионы, тем самым увеличивая их плотность потока на зонд. Поэтому, в рамках указанных выше предположений, можно показать, что плотность тока ионов равна

$$j_i = en_0 \left(\frac{kT_e}{m_i} \right)^{1/2} \exp\left(-\frac{1}{2}\right) \quad (4)$$

(вывод формулы см. в [4]).

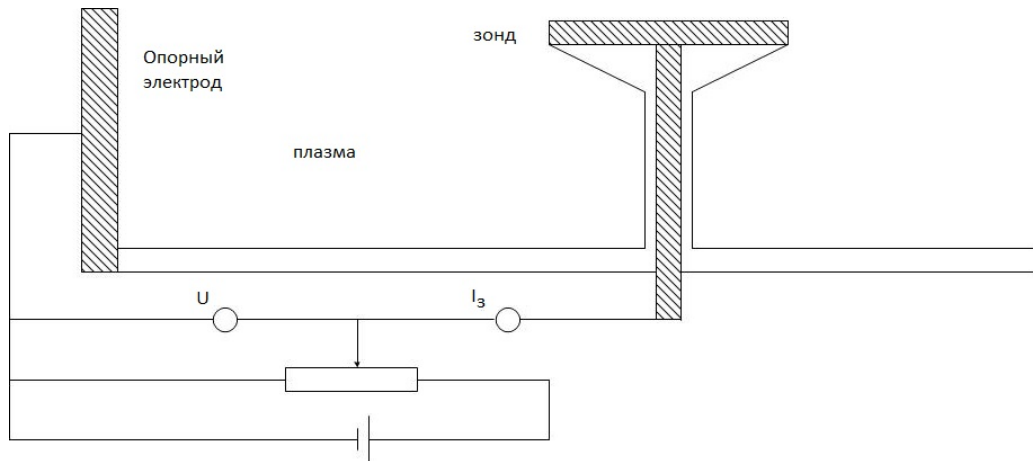


Рис. 3. Плоский одиночный зонд.

3.1.1 ВАХ одиночного зонда

Снимая вольт-амперную характеристику (ВАХ) одиночного зонда можно получить плотность и температуру электронов плазмы. Перед тем, как говорить об определении параметров плазмы, рассмотрим саму ВАХ одиночного зонда, представленную на рис. 4.

Сначала пусть зонд отключен от источника напряжения. Тогда суммарный ток на зонд будет равен нулю, и он окажется под отрицательным относительно плазмы потенциалом, который называют плавающим потенциалом. Для понимания того, что данный потенциал отрицательный относительно плазмы, достаточно написать плотность потока одного сорта частиц (электронов или ионов) в плазме:

$$j = \frac{1}{4} \bar{v} n_0, \quad (5)$$

где \bar{v} - тепловая скорость частиц данного сорта. Из формулы 5 видно, что плотность потока электронов намного больше плотности потока ионов (т.к.

$T_e \gg T_i$ и $m_e \ll m_i$), а значит, чтобы потоки электронов и ионов на зонд были одинаковыми, потенциал зонда должен быть отрицательным относительно плазмы для отталкивания электронов.

Если подключить источник напряжения к одиночному зонду и повышать на нем потенциал от плавающего потенциала, то потенциальный барьер между зондом и плазмой для электронов будет постепенно снижаться, и плотность тока на зонд будет убывать до тех пор, пока не достигнет плотности тока насыщения электронов (плотности тока электронов в невозмущенной плазме)

$$j_{e0} = \frac{1}{4} n_0 e v_e. \quad (6)$$

При понижении потенциала зонда от его плавающего потенциала плотность тока растет и, в итоге, достигает плотности тока насыщения ионов j_i , даваемой выражением (4).

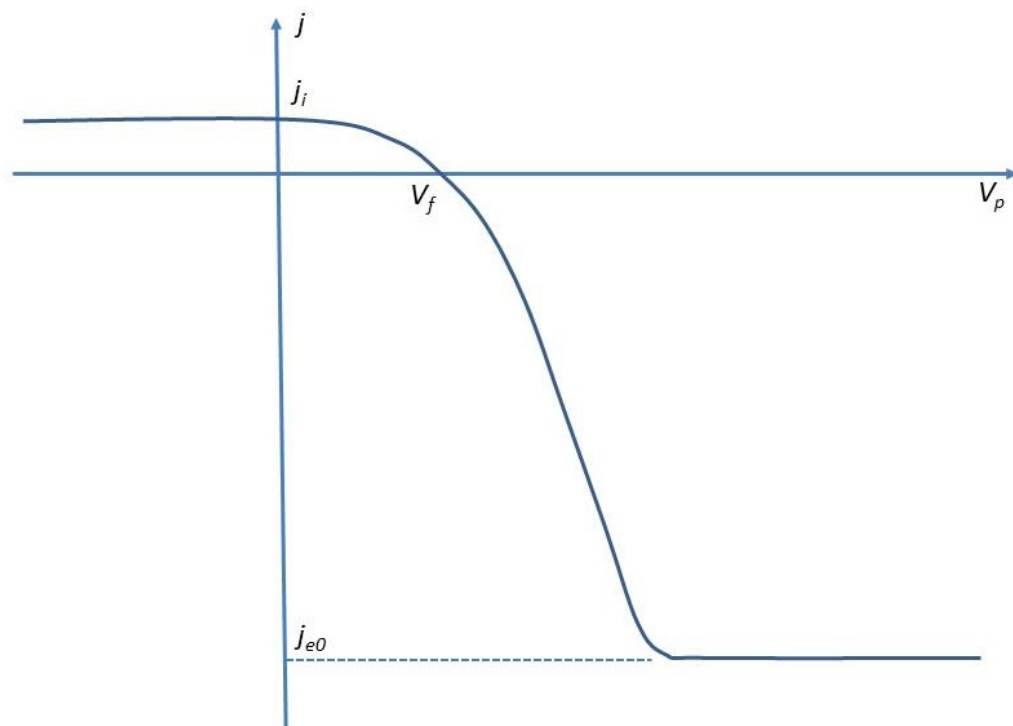


Рис. 4. Схематическая ВАХ одиночного зонда. j -плотность тока, текущего на зонд, V_p -потенциал зонда относительно плазмы, V_f -плавающий потенциал зонда.

3.1.2 Определение n_0 и T_e

Для определения n_0 и T_e достаточно рассмотреть верхнюю часть ВАХ зонда.

Полный ток на зонд при его отрицательном потенциале относительно плазмы равен

$$I = I_{i0} + I_{e0} \exp\left(\frac{e(V_p - V_{plasma})}{kT_e}\right), \quad (7)$$

где I_{i0} и I_{e0} -полный ток насыщения ионов и электронов соответственно. При измерении температуры электронов T_e не в Кельвинах, а в электронвольтах (если T_e в эВ, то это всегда будет указываться в квадратных скобках), формула (7) приобретает вид:

$$I = I_{i0} + I_{e0} \exp\left(\frac{(V_p - V_{plasma})}{T_e[\text{эВ}]}\right). \quad (8)$$

Отсюда получается следующее выражение:

$$\ln(I_{i0} - I) = \ln(-I_{e0}) + V_p / T_e[\text{эВ}] - V_{plasma} / T_e[\text{эВ}]. \quad (9)$$

Таким образом, измеряя по ВАХ I_{i0} , по углу наклона графика $\ln(I_{i0}-I)$ от V_p можно определить T_e . А зная T_e и площадь поверхности зонда в плазме S , из формулы (4) находится плотность электронов плазмы

$$n_0 = \frac{I_{i0}}{Se} \exp\left(\frac{1}{2}\right) \left(\frac{m_i}{kT_e}\right)^{1/2}. \quad (10)$$

3.2 Тройной зонд

Рассмотрим 3 одинаковые проволоки P_1, P_2, P_3 , помещенные в плазму, которые соединены между собой так, как показано на рис. 5.

Как было замечено, плотность потока электронов намного больше плотности потока ионов, а значит, потенциалы всех проволок ниже потенциала плазмы (иначе, если потенциал проволоки P_1 будет больше потенциала плазмы, то ток электронов, текущий на данную проволоку будет некомпенсирован). Тогда, обозначая модуль разности потенциала i -ой

проволоки и плазмы за V_i , плотность тока ионов на зонд за j_i , площадь собирающей поверхности проволок за S , запишем ток (положительные направления данного тока обозначены на рис. 5), текущий на каждую проволоку:

$$-I_1 = -Sj_e \exp(-\phi V_1) + Sj_i(V_1) \quad (11)$$

$$I_2 = -Sj_e \exp(-\phi V_2) + Sj_i(V_2) \quad (12)$$

$$I_3 = -Sj_e \exp(-\phi V_3) + Sj_i(V_3), \quad (13)$$

где

$$\phi = \frac{e}{kT_e}. \quad (14)$$

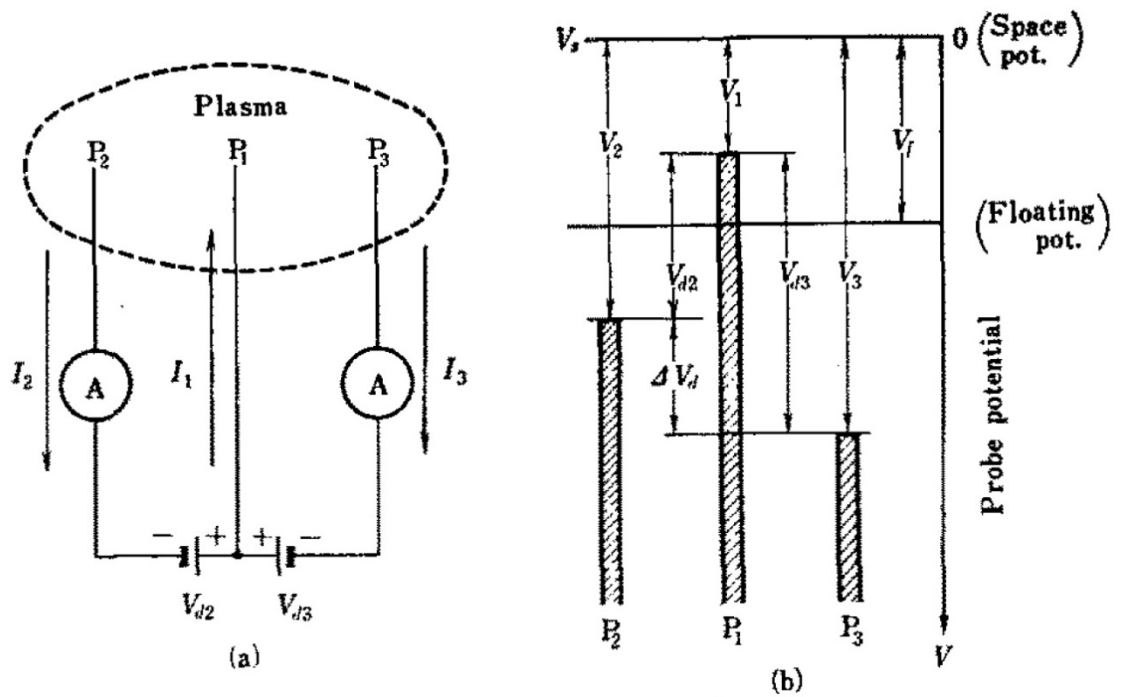


Рис. 5. (а)-тройной зонд, (б)-потенциалы проволок. Рисунок взят из [3].

Если предположить, что j_i не зависит от приложенного напряжения (т.е. $j_i(V_1)=j_i(V_2)=j_i(V_3)$), то из уравнений (11), (12), (13) следует

$$\frac{I_1 + I_2}{I_1 + I_3} = \frac{1 - \exp(-\phi V_{d2})}{1 - \exp(-\phi V_{d3})}, \quad (15)$$

где $V_{d2}=V_2-V_1$, $V_{d3}=V_3-V_1$, а из уравнений (12), (13) путем исключения Sj_i получается

$$Sj_i = \frac{I_3 - I_2 \exp(-\phi(V_{d3} - V_{d2}))}{1 - \exp(-\phi(V_{d3} - V_{d2}))}. \quad (16)$$

Теперь рассмотрим схему, которая была использована в экспериментах, описанных в следующих разделах. В данной схеме проволока P_2 отсоединена от всех других проволок (см. рис. 6). Тогда суммарный ток на эту проволоку будет равен нулю, т.е. $I_2=0$, $I_3=I_2$, и она будет находиться под плавающим потенциалом. В этом случае уравнения (15) и (16) преобразуется в следующие выражения:

$$\frac{1 - \exp(-\phi V_{d2})}{1 - \exp(-\phi V_{d3})} = \frac{1}{2}. \quad (17)$$

$$Sj_i = \frac{I_3}{1 - \exp(-\phi(V_{d3} - V_{d2}))}. \quad (18)$$

Температура электронов находится из выражения (17). Если $V_{d3}\phi \gg 1$ то экспонентой в знаменателе можно пренебречь (на самом деле, можно найти, что должно выполняться условие $\exp(-\phi V_{d3}) \ll \ln 2/2 = 0,34$, т.е. достаточно, чтобы $V_{d3}\phi > 3$) и выражение (17) с помощью выражения (14) можно переписать так:

$$\phi = \frac{\ln 2}{V_{d2}} \quad (19)$$

$$T_e[\text{эВ}] = \frac{V_{d2}}{\ln 2}. \quad (20)$$

Плотность электронов плазмы находится из уравнения (18). Действительно, предполагая $(V_{d3} - V_{d2})\phi \gg 1$, из (18) получаем, что ток, текущий по проволокам P_1 и P_3 равен ионному току, текущему на один зонд. Тогда плотность плазмы рассчитывается по формуле (10).

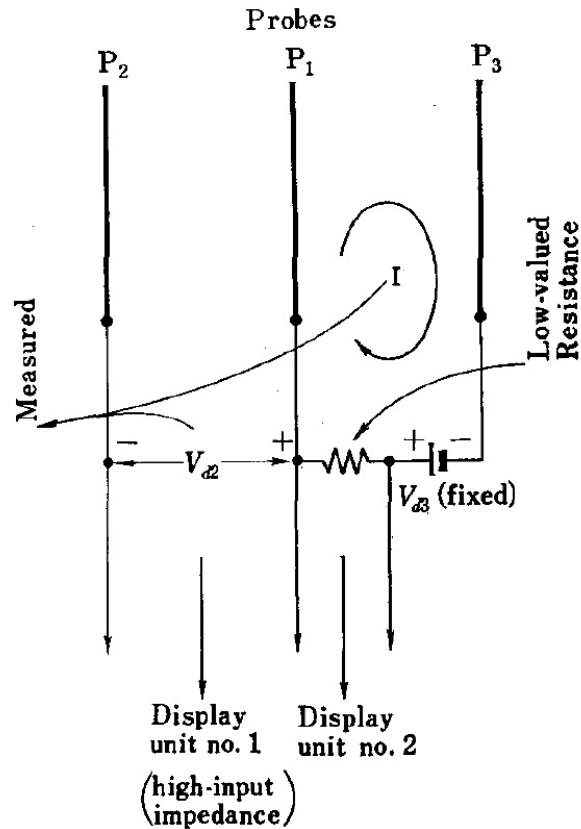


Рис. 6. Схема тройного зонда, используемая в экспериментах. Рисунок взят из [3].

3.3 Эмиссионный зонд

Эмиссионный зонд представляет собой нагретый одиночный зонд. Если данный зонд нагрет достаточно, то его плавающий потенциал будет почти равен потенциалу плазмы. Действительно, при повышении температуры данного зонда, эмиссия электронов из него растет, а значит, его плавающий потенциал тоже повышается. Когда при повышении температуры потенциал зонда становится больше, чем потенциал плазмы, поле зонда возвращает излишек электронов назад, тем самым поддерживая плавающий потенциал зонда около плазменного потенциала.

Не совсем понятно, до какой температуры нужно греть эмиссионный зонд для его правильной работы. Поэтому для получения потенциала плазмы в определенной точке пространства нужно снять зависимость плавающего потенциала зонда от его температуры и по этой зависимости определить

высоту полки, на которую выходит плавающий потенциал при высоких температурах (см. [5]).

4. Реализация зондов

Была построена диагностика, включающая описанные выше зонды. Диагностика представляет собой блок зондовых измерений, чьи выходы 1, 2, 3, 4, 5 (см. рис. 8) выведены в плазму через переходник. Внешний вид данного блока представлен на рис. 7, его электрическая схема показана на рис. 8, плазменный вид зондов (т.е. внешний вид кончиков зондов, выведенных в плазму) и параметры их проволок представлены на рис. 9.

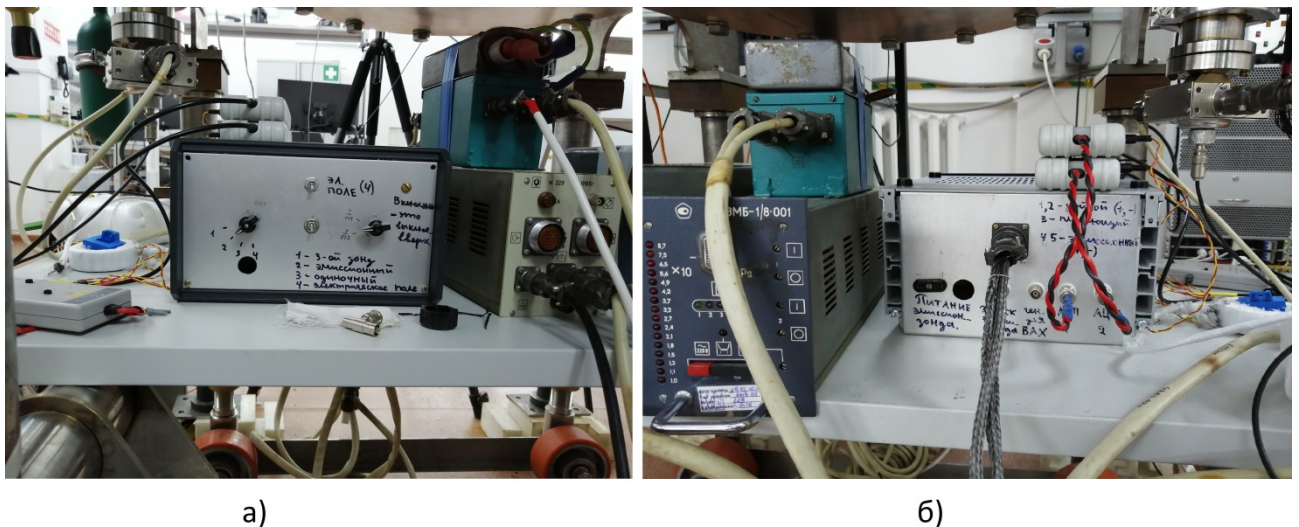


Рис. 7. Внешний вид блока зондовых измерений. а) вид сзади, б) вид спереди.

Блок зондовых измерений может работать в четырех режимах: режим тройного зонда, режим эмиссионного зонда, режим одиночного зонда и режим измерения электрического поля. Переключение режимов производится с помощью галетного переключателя, изображенного на рис. 8 слева, соответствия положений галетного переключателя и режимов работы блока зондовых измерений приведено снизу. Так, к примеру, при нахождении галетного переключателя в положении 1 блок зондовых измерений будет работать в режиме тройного зонда: АЦП 1 будет снимать

сигнал с канала 1, АЦП 2 с канала 2, а земля обоих АЦП будет присоединена к gnd1.

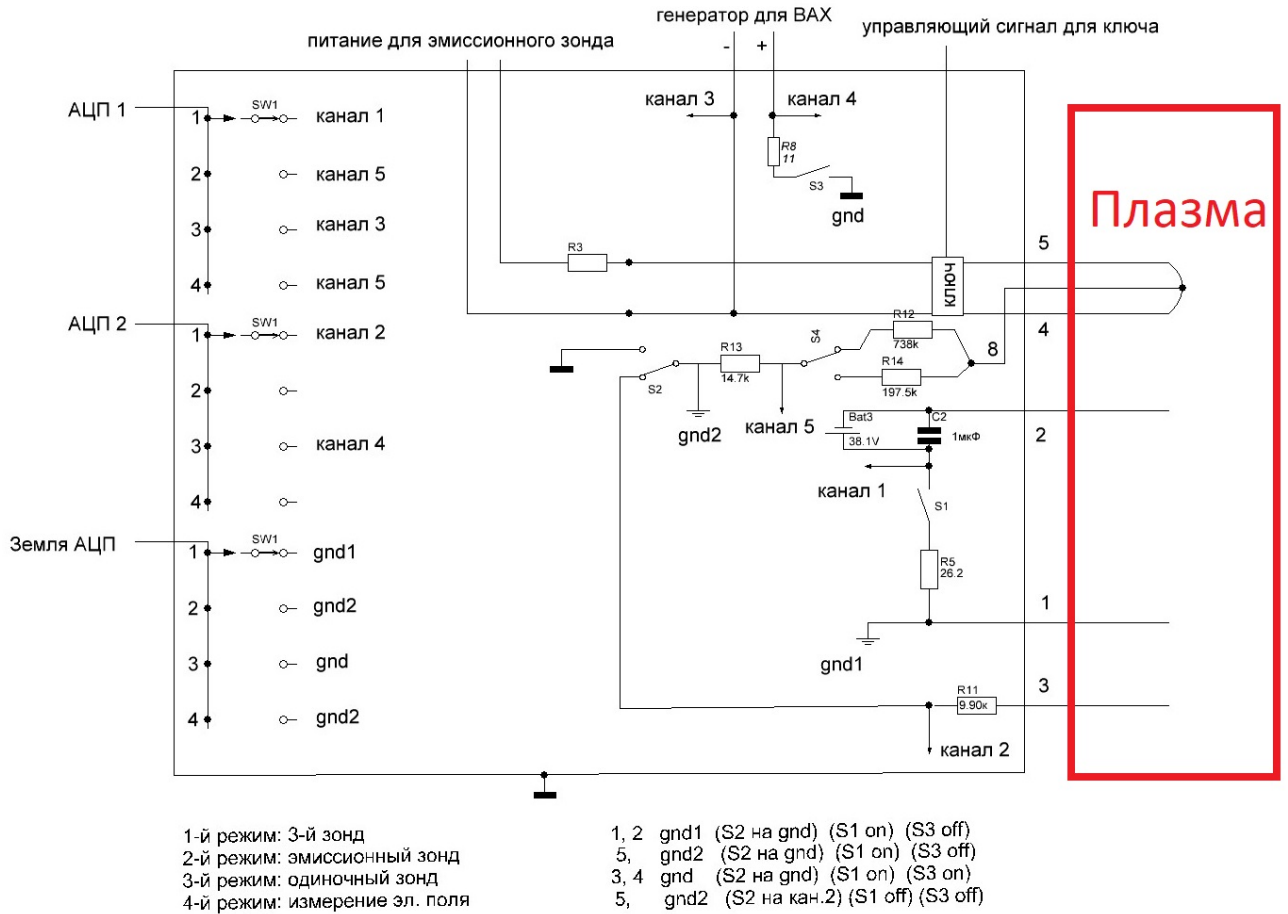
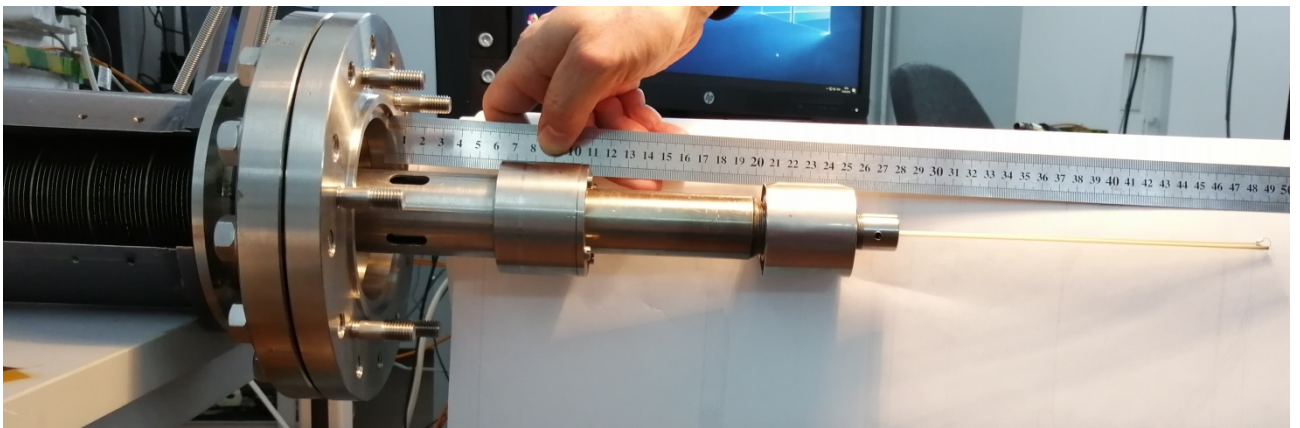


Рис. 8. Электрическая схема блока зондовых измерений. Слева изображен галетный переключатель. Выводы 1, 2, 3, 4, 5 через переходник выведены в плазму.



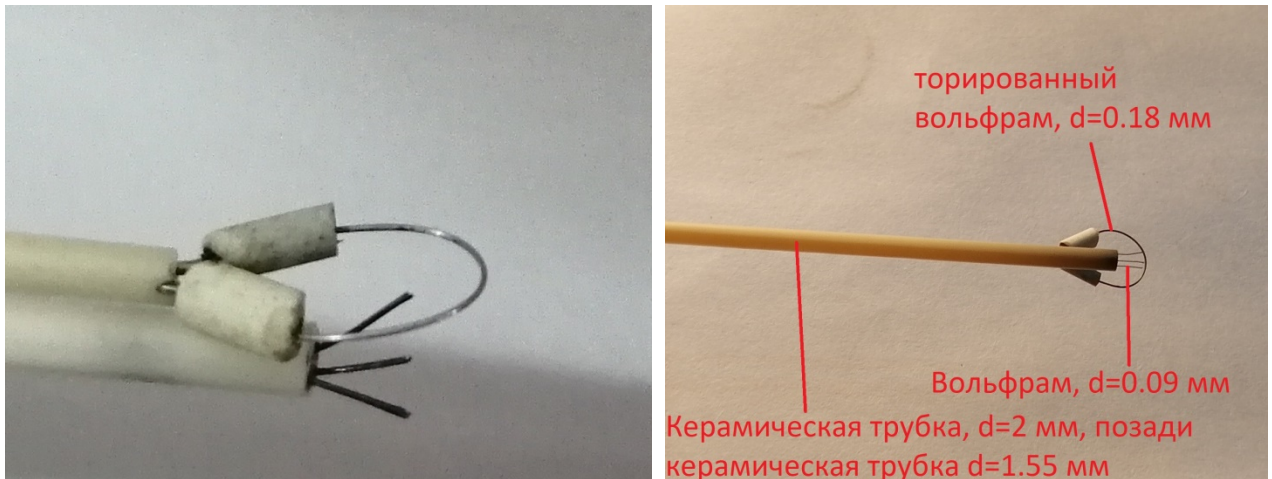


Рис. 9. Вид плазменной части зондов.

Стоит отдельно сказать о работе блока зондовых измерений в режиме эмиссионного зонда (галетный переключатель в положении 2), который, в отличие от остальных режимов, еще не доделан до конца. В данном режиме планируется нагревать зонд периодическим сигналом (т.е. пропускать через зонд периодический ток), скважность которого можно менять. Таким образом, можно снять зависимость потенциала зонда от нагревного тока в определенной точке и по данной зависимости понять, где потенциал зонда уходит в насыщение. Значение потенциала зонда в насыщении будет являться потенциалом плазмы. Более подробно о работе и изготовлении эмиссионного зонда написано в приложении.

5. Измерение параметров плазмы

Температуру и плотность электронов удобнее всего измерять с помощью тройного зонда, поэтому сначала его работа была проверена с помощью одиночного зонда, а потом им (тройным зондом) было снято распределение параметров плазмы вдоль ее диаметра. Местоположение зондов указано на рис. 2.

5.1 Проверка работы тройного зонда

Для проверки работы тройного зонда использовались 5 одинаковых выстрелов установки СМОЛА (выстрелы 3418-3421, 3425) в режиме работы “прямое поле”, который характеризуется тем, что обмотка транспортной секции, с помощью которой создается радиальная составляющая магнитного поля, отключена. Выстрелы 3418-3421 использовались для получения ВАХ одиночного зонда в точке на оси установки, а выстрел 3425 для получения данных с тройного зонда в той же точке.

Для снятия верхней части ВАХ одиночного зонда к блоку зондовых измерений были подключены источник переменного напряжения и источник постоянного напряжения так, как показано на рис. 10. Источник постоянного напряжения имел напряжение 15 В в выстрелах 3418, 3419 и 25 В в выстрелах 3420, 3421, амплитуда сигнала и частота сигнала источника переменного напряжения не менялись во время эксперимента и оставались равными 15 В и 80 Гц соответственно.

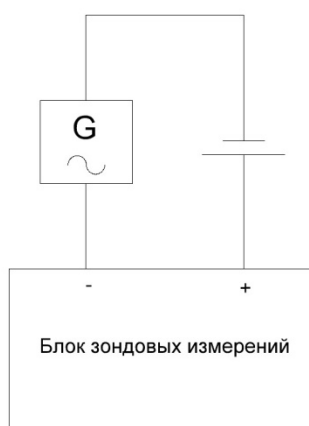


Рис. 10. Схема подключения источника переменного напряжения и источника постоянного напряжения к блоку зондовых измерений.

Полученные в выстрелах 3418-3421 данные обрабатывались следующим образом:

- из первоначальных данных (первоначальные данные для выстрелов 3418 и 3420 представлены на рис. 11) для пяти периодов потенциала зонда в выстрелах 3418-3421 были найдены ВАХ. Затем из них была посчитана усредненная ВАХ для каждого выстрела.
- из этих усредненных ВАХ была посчитана усредненная по всем выстрелам ВАХ, представленная на рис. 12.
- была построена прямая зависимости $\ln(I_{i0}-I)$ от V_p (см. формулу (9)) и из нее была определена T_e . Прямая зависимости $\ln(I_{i0}-I)$ от V_p представлена на рис. 13.
- по известным T_e и I_{i0} по формуле (10) была посчитана n_0 .

В итоге, было получено, что $T_e=7$ эВ, $n_0=1,2*10^{18} \pm 0,4*10^{18} \text{ м}^{-3}$.

Из данных выстрела 3425, представленных на рис. 14, по формулам (10) и (20) найдены усредненные по времени (от 80 мс до 180 мс) значения параметров плазмы: $T_e=5$ эВ, $n_0=1*10^{18} \pm 0,1*10^{18} \text{ м}^{-3}$.

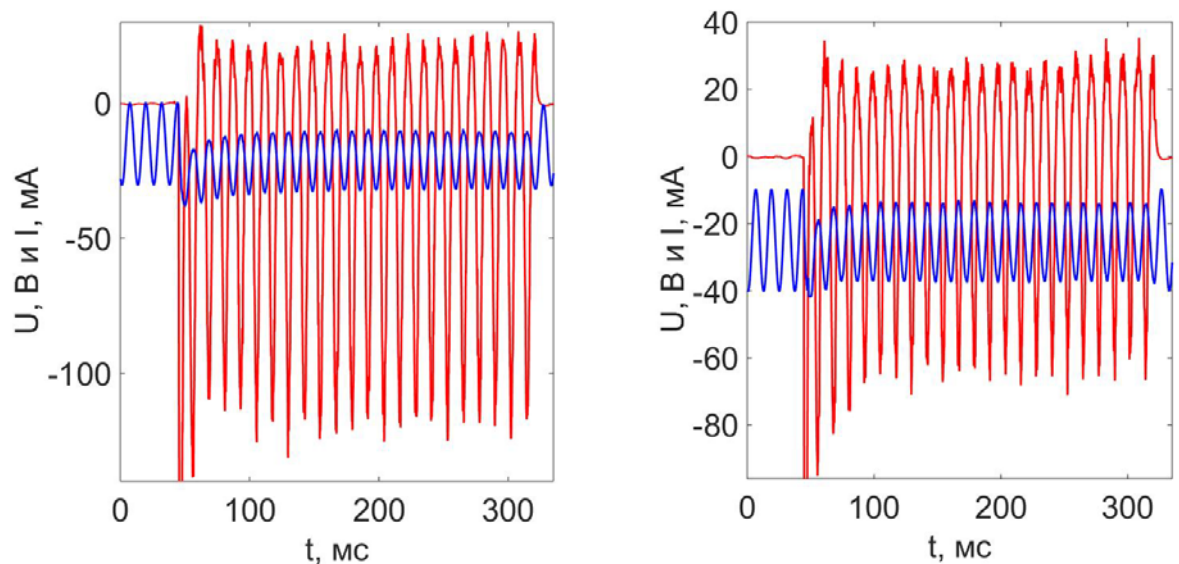


Рис. 11. Зависимости тока, текущего на зонд I (красная кривая) и потенциала зонда относительно земли установки U (синяя кривая) от времени для выстрелов 3418 (слева) и 3421 (справа).

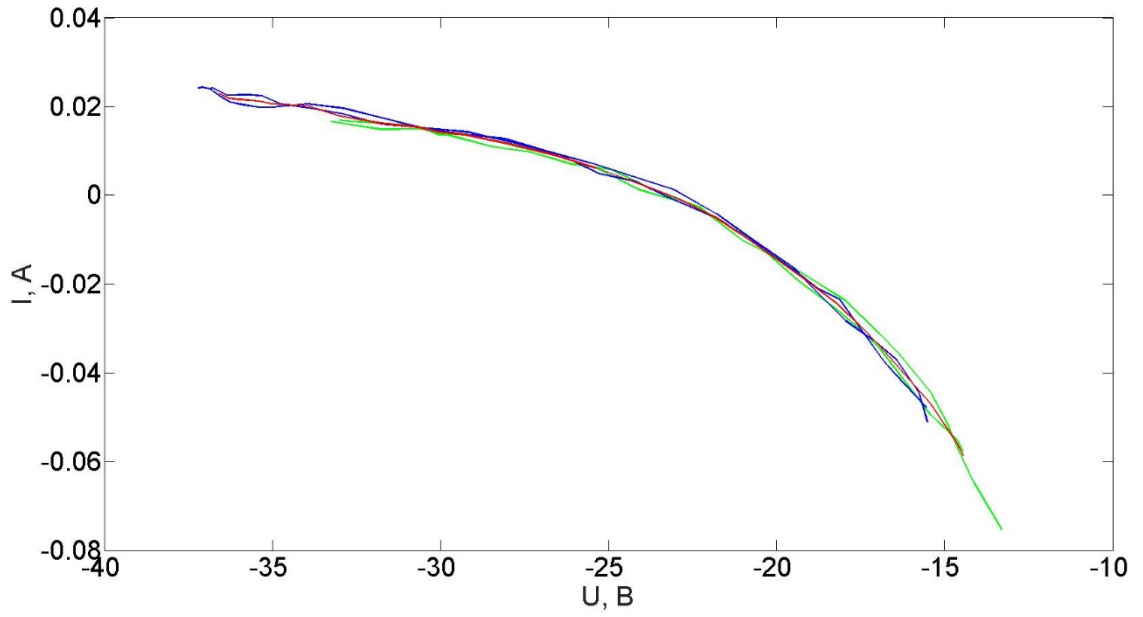


Рис. 12. ВАХ одиночного зонда. Зеленые линии-ВАХ выстрелов 3418 и 3419, синие кривые-ВАХ выстрелов 3420 и 3421, красная кривая-усредненная ВАХ по всем выстрелам.

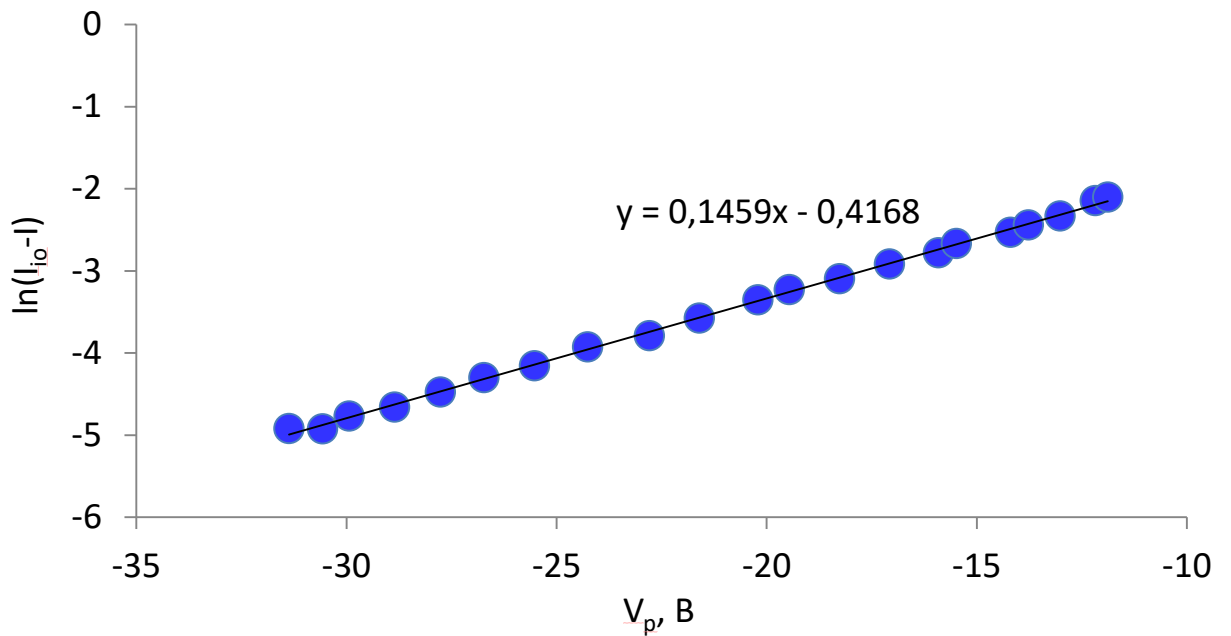


Рис. 13. Зависимость $\ln(I_{i0}-I)$ от V_p .

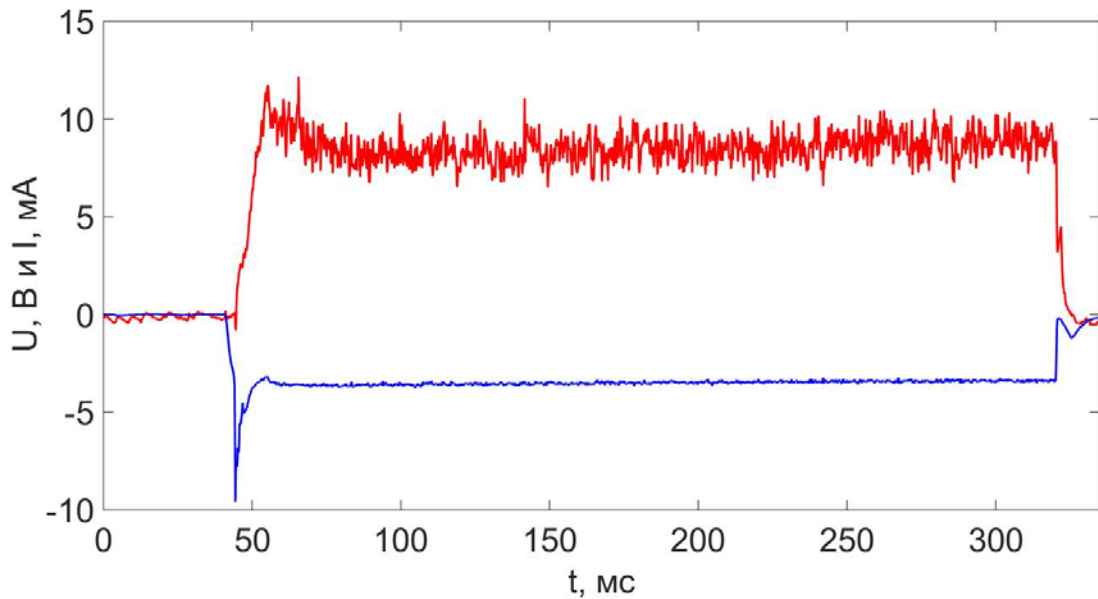


Рис. 14. Зависимости тока, текущего на зонд (красная кривая) и его плавающего потенциала (синяя кривая), т.е. $-V_{d2}$ и I , обозначенные на рис. 6, от времени.

Видно, что плотности, полученные с одиночного и тройного зондов, совпадают, а температура нет. Различие температур можно объяснить тем, что для измерения параметров с помощью одиночного зонда, используется верхняя часть ВАХ, а, значит, данный зонд показывает только температуру высокоэнергетических электронов. Несмотря на то, что зависимость $\ln(I_{i0}-I)$ от V_p представляет собой прямую, что указывает на подчинение высокоэнергетических электронов распределению Максвелла, электроны более низких энергий могут иметь другое распределение. А значит, тройной зонд может показывать температуру электронов, отличающуюся от температуры электронов, найденную с помощью одиночного зонда. Таким образом, показания одиночного зонда не противоречат показаниям тройного, поэтому в дальнейшем будет считаться, что тройной зонд можно использовать для измерения параметров плазмы.

5.2 Распределение температуры и плотности электронов плазмы вдоль ее диаметра

С помощью тройного зонда было измерено распределение параметров плазмы вдоль ее диаметра для таких режимов работы установки СМОЛА, как “прямое поле” и “винтовое поле” (режим “винтовое поле” отличается от режима “прямое поле” только тем, что включена обмотка транспортной секции). Графики зависимости температуры и плотности электронов от расстояния до центра установки представлены на рис. 15 и рис. 16.

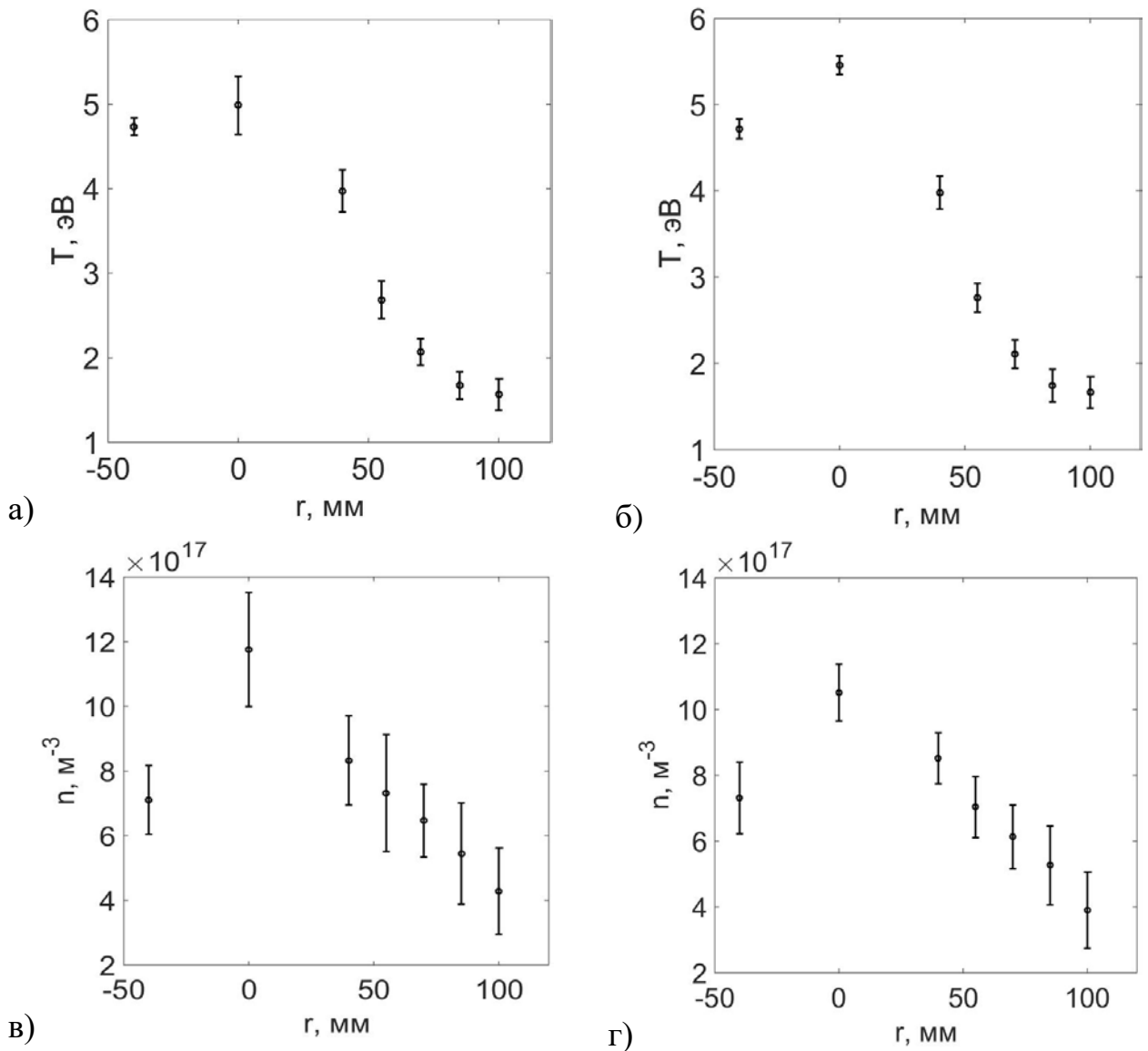


Рис. 15. Зависимости температуры T_e и плотности n_0 электронов от расстояния до центра установки r для режима “прямое поле” (а, в) и “винтовое поле” (б, г). Температура и плотность были усреднены по промежутку времени от 80 до 180 мс.

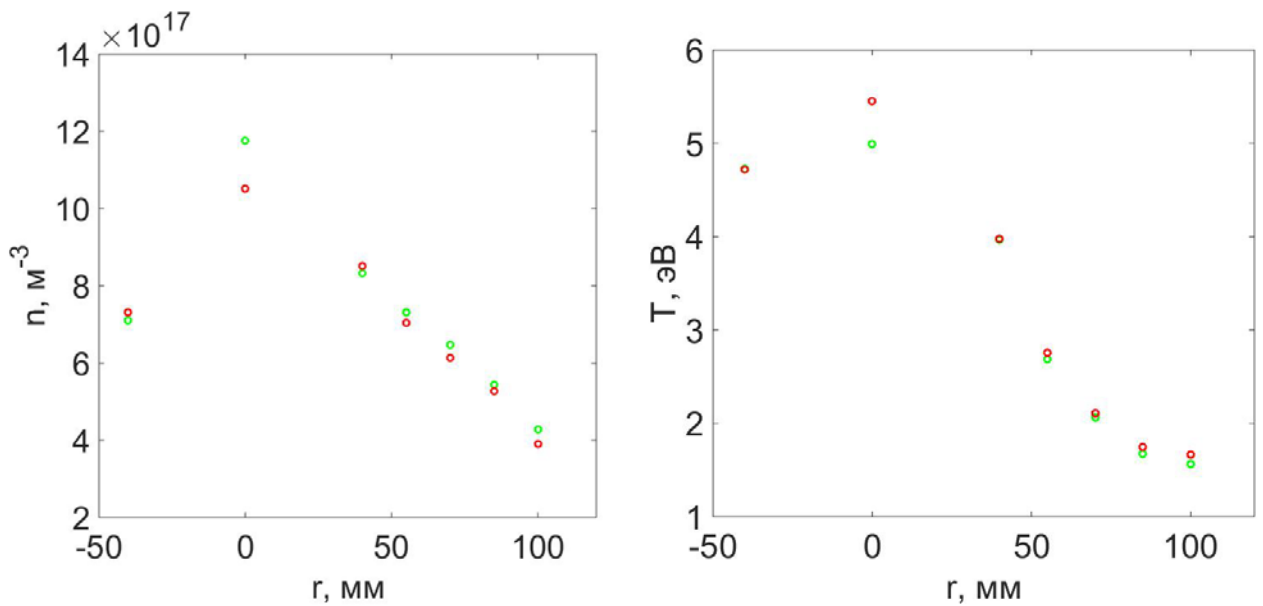


Рис. 16. Сравнение распределения параметров плазмы вдоль ее диаметра в режиме “прямое поле” (зеленые точки) с распределением в режиме “винтовое поле” (красные точки).

Из графиков, приведенных на рис. 16 видно, что параметры плазмы в режимах “прямое поле” и “винтовое поле” совпадают в пределах погрешностей. Поэтому можно сказать, что вращение плазмы в транспортной секции не влияет на параметры плазмы перед плазменной пушкой, где проводились измерения.

6. Выводы

В ходе работы был сконструирован блок зондовых измерений, способный работать в режимах одиночного, тройного, эмиссионного зондов и в режиме измерения электрического поля. Была проверена работа тройного зонда, после чего было снято распределение температуры и плотности электронов плазмы вдоль ее диаметра перед плазменной пушкой во входном расширителе.

7. Литература

1. A. V. Sudnikov, A. D. Beklemishev, V. V. Postupaev, A. V. Burdakov, I. A. Ivanov, N. G. Vasilyeva, K. N. Kuklin, E. N. Sidorov. SMOLA device for helical mirror concept exploration. *Fusion Engineering and Design*, 122, 86–93 (2017).
2. Методы исследования плазмы. / Под ред. В. Лохте-Хольтгревена. М.: Мир, 1971.
3. SinLi Chen and T. Sekiguchi. Instantaneous Direct-Display System of Plasma Parameters by Means of Triple Probe. *Journal of Applied Physics*, 36(8), 2363–2375 (1965).
4. J. E. Allen, R. L. F. Boyd, and P. Reynolds, *Proc. Phys. Soc. (London)* 70B, 297 (1957).
5. S. P. Tierno, E. Roibás, J. L. Doménech-Garret, J. M. Donoso, and L. Conde, “Measurements of the plasma properties using the floating potential of emissive Langmuir probes,” *Contrib. Plasma Phys.*, vol. 53, no. 1, pp. 16–21, Jan. 2013.

8. Приложение.

Тут будет подробно рассмотрена конструкция и предполагаемая работа эмиссионного зонда.

8.1.1 Конструкция эмиссионного зонда

Электрическая схема эмиссионного зонда вне блока зондовых измерений, которая не нарисована на рис. 8 представлена на рис. 17.

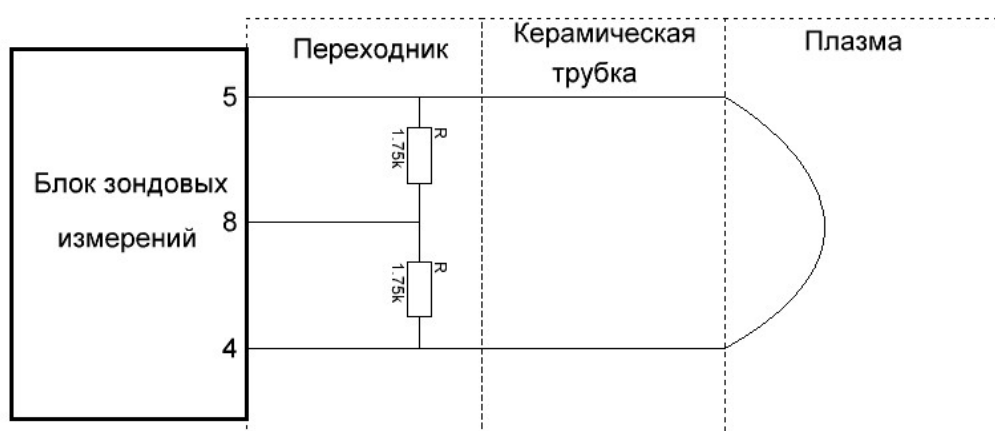


Рис. 17. Электрическая схема эмиссионного зонда вне блока зондовых измерений.

Сам эмиссионный зонд, приведенный на рис. 18, был сделан следующим образом:

- молибденовая проволока диаметром 0,4 мм было просунута в керамическую трубку, имеющую внешний диаметр 1,55 мм и два отверстия диаметром 0,4 мм.
- один кончик уже скрученного в петлю торированного вольфрама был приварен к молибдену с помощью лазерной сварки, после чего на место сварки была надета керамическая трубка, которая фиксировала вольфрамовую и молибденовую проволоку около данного места. Без этой трубки вольфрам ломался около места

сварки при попытке сварки второго конца вольфрамовой проволоки.

- второй конец вольфрамовой проволоки приваривался ко второй молибденовой проволоке, после чего на место сварки тоже надевалась керамическая трубка.

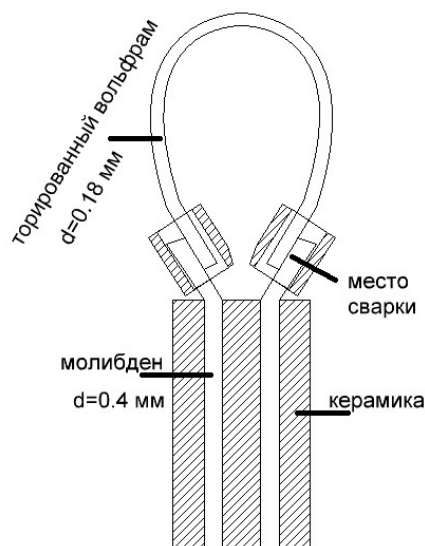


Рис. 18. Кончик эмиссионного зонда.

8.1.2 Работа эмиссионного зонда

Как уже говорилось в разделе 5, зонд планируется нагревать с помощью периодического сигнала, скважность которого можно менять. Для этого к блоку зондовых измерений нужно присоединить аккумулятор к входу блока зондовых измерений “питание эмиссионного зонда”. Периодический сигнал с заданной скважностью создается благодаря ключу, который контролируется управляющим сигналом (см. рис. 8). Если считать, что нагрев зонда происходит только из-за тока, текущего через него, то при нагреве периодическим током (который подается на зонд в виде прямоугольного сигнала) с амплитудой 3,3 А, периодом 0,1 с температура зонда будет меняться так, как показано на рис. 19.

Но, было замечено, что эмиссионный зонд, помещенный на ось установки, заметно греется плазмой (это видно на рис. 20), поэтому для того, чтобы не расплавить зонд, планируется контролировать его нагрев предварительно прокалиброванной камерой.

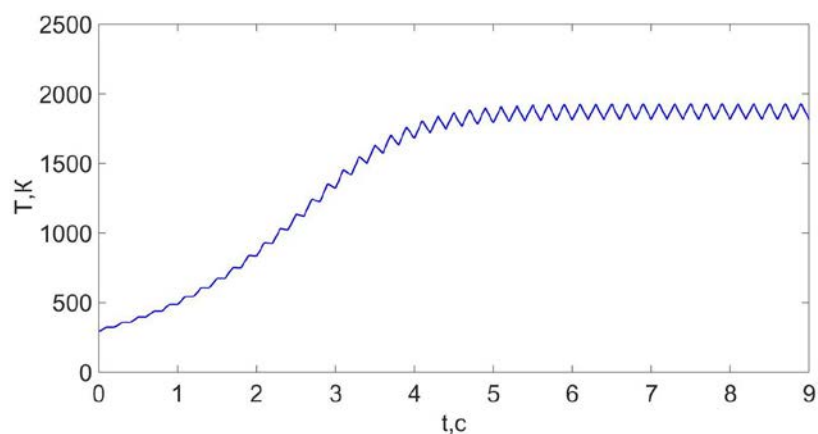


Рис. 19. Зависимость температуры эмиссионного зонда от времени.

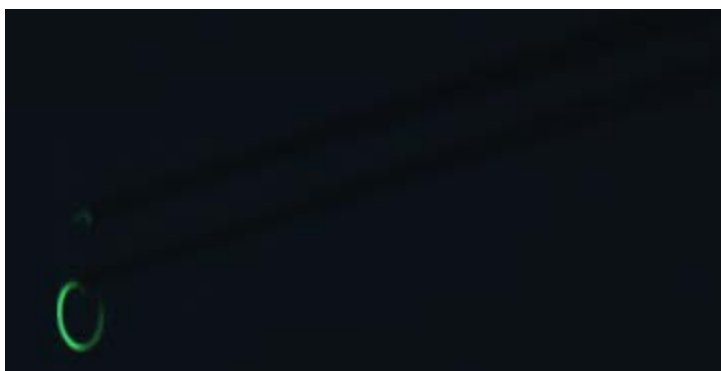


Рис. 20. Фото эмиссионного зонда через фильтр СЗС21 сразу после выстрела.