

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**

Толкачева Михаила Сергеевича

(Фамилия, Имя, Отчество автора)

Тема работы Анализатор распределения ионов по продольным энергиям в винтовой открытой ловушке СМОЛА

---

---

**«К защите допущена»**

Заведующий кафедрой

ученая степень, звание

должность, место работы

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

«.....».....20...г.

**Научный руководитель**

ученая степень, звание

должность, место работы

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

«.....».....20...г.

Дата защиты: «.....».....20...г.

Новосибирск, 2019

## Оглавление

Введение.....	3
Глава 1. Условия эксперимента и установка СМОЛА.....	6
1.1 Установка СМОЛА .....	6
1.2. Условия эксперимента.....	9
Глава 2. Прототип сеточного ионного анализатора .....	12
2.1. Метод задерживающего потенциала.....	12
2.2 Конструкция прототипа анализатора.....	14
2.3 Схемы регистрации и питания.....	18
Глава 3. Результаты измерений .....	20
3.1 Обработка данных.....	20
3.2 Анализ измерений .....	21
Список литературы .....	26

## Введение

Создание термоядерного реактора является возможным решением проблемы обеспечения человечества экологически чистой энергией. Для проведения энергетически выгодной термоядерной реакции, необходимо удовлетворить критерию Лоусона:  $n\tau > 10^{20} \text{ м}^{-3} \text{ с}$ ,  $T > 10^8 \text{ К}$  (для реакции D-T), где  $n$ ,  $\tau$ ,  $T$  – плотность, время удержания в системе и температура плазмы соответственно. Необходимость достижения столь высоких температур порождает задачу об термоизоляции плазмы от стенок установки. Одним из возможных решений данной задачи является удержание плазмы в магнитном поле [1].

В настоящее время наибольшее распространение получил метод удержания плазмы в замкнутых ловушках: системах, где силовые линии магнитного поля замыкаются внутри рабочего объёма, такие как токамак и стелларатор. В ИЯФ СО РАН активно изучается альтернативный метод удержания – открытые ловушки, силовые линии магнитного поля в которых пересекают границу рабочего объёма. Открытые ловушки имеют ряд преимуществ перед замкнутыми: возможность осуществления бестритиевого и безнейтронного синтеза[2], простота конструкции и большая эффективность использования энергии магнитного поля, выражаемая в большем предельном  $\beta$ : отношении газокINETического давления к давлению магнитного поля. Так в открытой ловушке ГДЛ было достигнуто  $\beta \approx 0,6$ [3]. Основным же недостатком открытых ловушек является наличие ощутимых продольных потерь частиц и энергии.

С целью улучшения параметров удержания было предложено удерживать плазму в ловушках с магнитным полем, модулированным по длине. Геометрию классической многопробочной ловушки можно представить, как ряд пробкотронов с общей осью симметрии. При длине свободного пробега порядка и длине установки много больше периода гофрировки

распространение частиц принимает диффузный характер и время их жизни в установке зависит от её длины квадратично [4].

Изложенный выше подход к многопробочному удержанию является стационарным в том смысле, что максимумы магнитного поля неподвижны. Другим подходом к многопробочному удержанию является создание системы, в которой бы пробки двигались за счет внешнего источника питания [5]. В подобной системе теоретически были предсказаны два новых эффекта: нагрев плазмы при отражении от движущейся пробки и появление силы, направленной к центру ловушки [4]. Время удержания при этом зависит от длины экспоненциально. На сегодняшний день создание подобной системы с  $R-1 \gg 0$  технически невозможно [6]. В то же время, возможно создание системы, в которой магнитные пробки покоятся в лабораторной системе отсчёта и движутся в системе отсчёта плазмы. В этом случае ситуация будет аналогична системе с нестационарными пробками. В частности, для плазмы, вращающейся в спирально-симметричном стационарном поле, пробки будут казаться скользящими в продольном направлении [7]. Для экспериментальной проверки данной концепции в ИЯФ СО РАН была создана установка СМОЛА. В экспериментах на установке предполагается исследовать два режима её работы: режим удержания, в котором плазма активно закачивается обратно в ловушку, и режим ускорения, в котором плазма ускоряется при выходе из области спирального поля, что может найти практическое приложение в качестве плазменного двигателя.

При прохождении области со спиральным полем распределение пролетных ионов по энергиям должно изменяться. В режиме удержания должны наблюдаться два противоположных эффекта: с одной стороны, направленная скорость ионов должна уменьшаться, что должно приводить к смещению максимума функции распределения, с другой ионы с низкой энергией должны более эффективно удерживаться, что может приводить к увеличению средней энергии пролетных ионов. В режиме же ускорения предсказывается смещение

максимума функции распределения, соответствующее добавленной за счет движения пробок скорости. Данные предположения требуют экспериментальной проверки, чем и обусловлена цель данной работы: создать средство диагностики, позволяющую изучить распределение ионов по энергиям.

Для выполнения данной цели были выдвинуты следующие задачи:

1. Спроектировать и собрать диагностику для измерения функции распределения с необходимыми параметрами;
2. Провести серию экспериментов с использованием данной диагностики в плазме установки СМОЛА;
3. Протестировать диагностику, проведя анализ измерений и выяснив возможные недочёты при проектировке.

# Глава 1. Условия эксперимента и установка СМОЛА

## 1.1 Установка СМОЛА

Как уже было упомянуто ранее, установка СМОЛА была создана для экспериментальной проверки метода винтового удержания и ускорения. Основная идея метода заключается в создании системы, в которой бы существовала область со спиральным полем, а плазма вращалась в скрещенных  $\vec{E} \times \vec{B}$  полях. В собственной системе отчета плазмы спиральное магнитное поле вращается. Продольная компонента скорости движения магнитных пробок в системе отсчета плазмы задается формулой:

$$V_z \approx \frac{chE_r}{2\pi aB_z},$$

Где  $a$  – радиус плазмы,  $h$  – шаг намотки,  $c$  – скорость света,  $B_z$  – продольное магнитное поле,  $E_r$  – радиальное электрическое поле[8].

Исходя из измеренных скорости вращения в спиральном поле  $\omega \approx 10^6 \text{ с}^{-1}$  и шага спирали в 0,18 м. скорость можно оценить как  $V_z \approx 1,8 * 10^5 \text{ м/с}$ .

Если направление движения магнитных возмущений противоположно направлению потока плазмы, действующая на запертые частицы сила приводит к перекачке плазмы обратно в установку, если эти направления совпадают, то возможно ускорение частиц до энергий, существенно превышающих энергию теплового движения [7].

Направление действия силы определяется тремя независимыми параметрами: направлением ведущего магнитного поля, правой или левой спиральностью винтового поля и знаком радиального электрического поля. Это позволяет выбрать произвольный (оптимизированный по другим причинам) знак радиального электрического поля, выбрав подходящее направление тока в магнитных катушках. Это также означает, что в конфигурациях с разной спиральностью, но с сонаправленными ведущим магнитным и электрическим полями будет создаваться противоположная по знаку сила, действующая на плазму.

Функция распределения ионов плазмы при винтовом удержании зависит от расстояния до оси установки. Это связано с тем, что пробочное зависит от радиуса, что приводит к изменению отношения числа захваченных и пролетных частиц. Перепад магнитного поля вдоль силовой линии зависит от радиуса квадратично, изменяясь для магнитной конфигурации установки СМОЛА при максимальном винтовом поле от 1 до  $\sim 3$  [7]. При радиусе плазменного шнура в винтовой части ловушки  $\sim 5$  см характерный размер изменения параметров функции, на котором доля запертых частиц и, следовательно, параметры функции распределения будут изменяться на величину порядка 10%, будет составлять 0.5 — 2 см.

Установка СМОЛА схематично представлена на рис. 1.1.

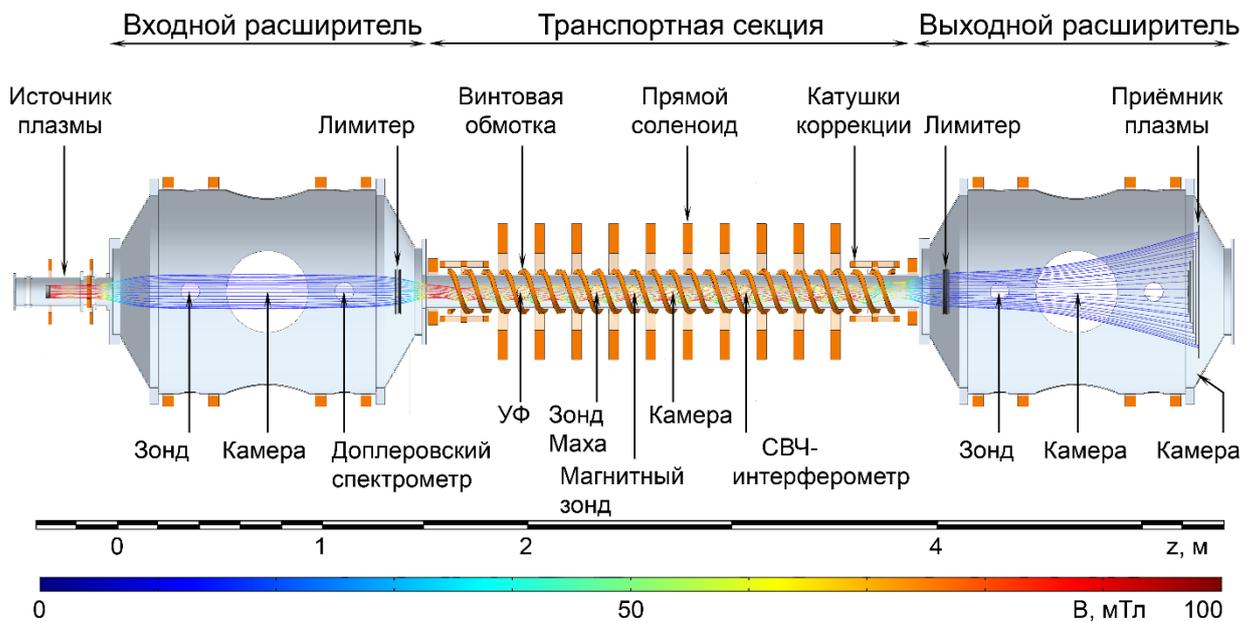


Рис. 1.1

Установка СМОЛА.

Установку можно условно разделить на три составные части: входной расширитель с плазменной пушкой, винтовая секция и выходной расширитель с плазмоприемником.

Расширители представляют из себя цилиндрические баки длиной 1,5 м и радиусом 60 см. На каждом из них установлено четыре плоских катушки, создающие продольное магнитное поле до 50 мТл.

Винтовая секция имеет длину 2,3 м и диаметр 16 см. Ее магнитная система состоит из двух спиральных проводников с противоположно направленными токами, индуцирующих спиральную составляющую, и 14 плоских катушек, создающих аксиальную. Диапазон напряженности аксиальной компоненты поля в винтовой секции 30-300 мТл, шаг спирали 18 см.

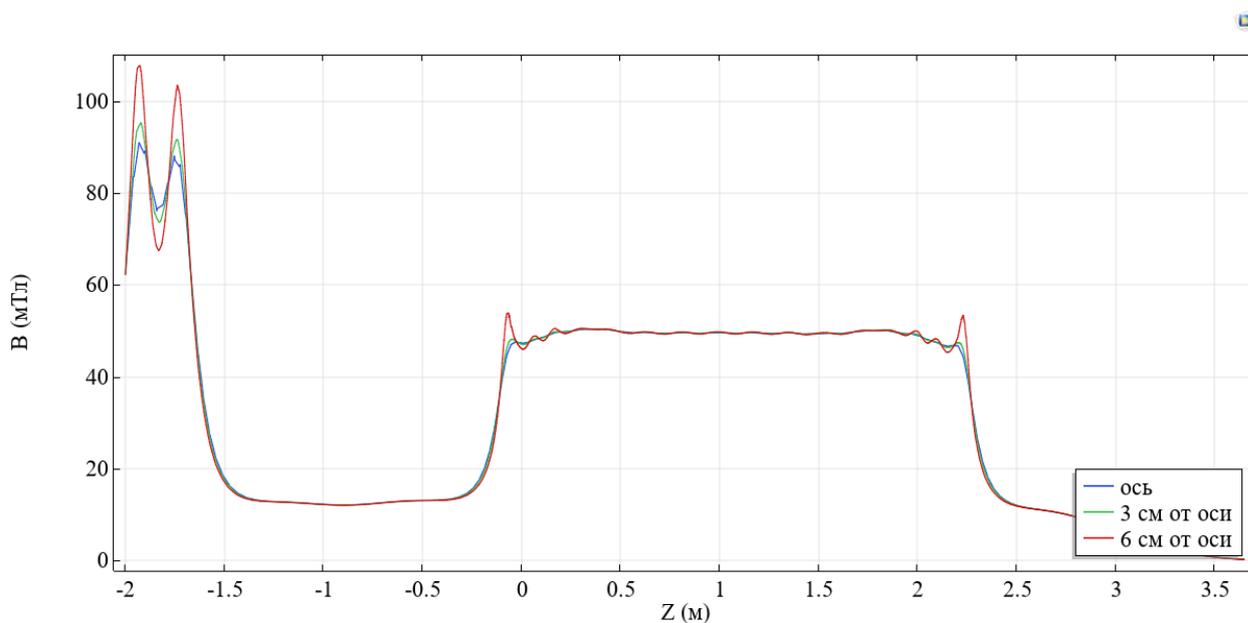


Рис.1.2.

Зависимость напряженности магнитного поля от  $z$  для трех разных расстояний от оси. Используемая в эксперименте осесимметричная плазменная пушка схематично представлена на рис.1.3.

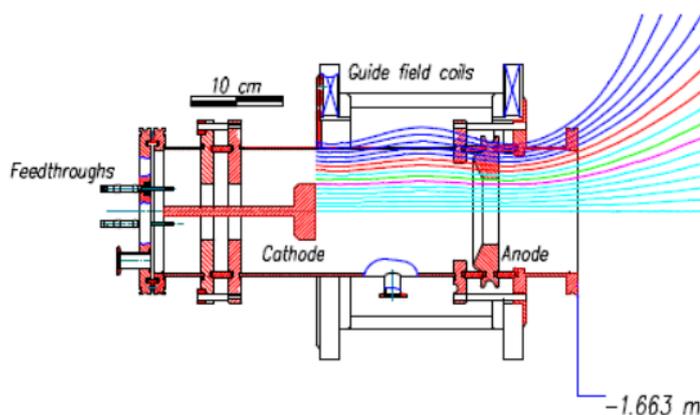


Рис. 1.3.

#### Плазменная пушка

Плазма с  $n \sim 2 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$  и  $T \sim 5 \text{ эВ}$  создается за счет разряда магнетронного типа между  $\text{LaV}_6$  катодом, выполненным в форме диска, и полым аксиально-симметричным медным анодом. Для обеспечения данного типа разряда

силовые линии магнитного поля, выходящие с границы катода, должны проходить на расстоянии порядка ларморовского радиуса от анода. Таким образом подавляется поперечная проводимость и токи замыкаются внутри объема остальной установки, тем самым вынося туда электрическое поле, нужное для вращения плазмы. В данном режиме радиальный профиль плотности плазмы близок к гауссовому. Косвенный накал катода осуществляется излучением нагревательного элемента в виде плоской вольфрамовой спирали [9].

В выходном расширителе частицы приходят вдоль линий магнитного поля на сегментированный плазмоприемник, составленный из 5 концентрических кольцевых пластин. Потенциал на каждую пластину подается независимо от других. В стандартном экспериментальном режиме разность потенциалов между соседними пластинами составляет порядка 50 В, полный перепад потенциалов между центральной и крайней пластинами составляет 200 В. Потенциал третьей пластины плазмоприёмника совпадает с потенциалом катода плазменной пушки.

Радиальное электрическое поле  $E_r \sim 10 - 100 \text{ В/см}$  создается разностью потенциалов между катодом и анодом плазменной пушки, а также между пластинами плазмоприемника.

Характерная длительность эксперимента составляет 0,1–1 с.

## 1.2. Условия эксперимента

Для определения того, как прохождение через область с винтовым полем влияет на функцию распределения плазмы, было решено установить диагностику в выходном расширителе (продольная координата  $z = 434$  по рис. 1.1).

В расширителе плазма имеет следующие параметры:  $n \approx 1 - 3 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$ ,  $T_i \approx 2 - 3 \text{ эВ}$ , характерная радиальный масштаб изменения функции распределения: 1 – 4 см. Магнитное поле в стандартном режиме  $B \sim 30 \text{ мТл}$ .

Исходя из условий и задач эксперимента можно выдвинуть следующие требования к диагностике:

- локальность измерений;
- энергия частиц порядка десятков эВ;
- возможность измерения по радиусу;

Для расчёта траекторий частиц внутри анализатора при различных радиальных координатах важно знать наклон силовых линий магнитного поля в области проведения измерений. Зависимость угла наклона силовых линий от расстояния от оси симметрии установки получена с помощью программного пакета COMSOL Multiphysics и представлена на рис. 1.4.

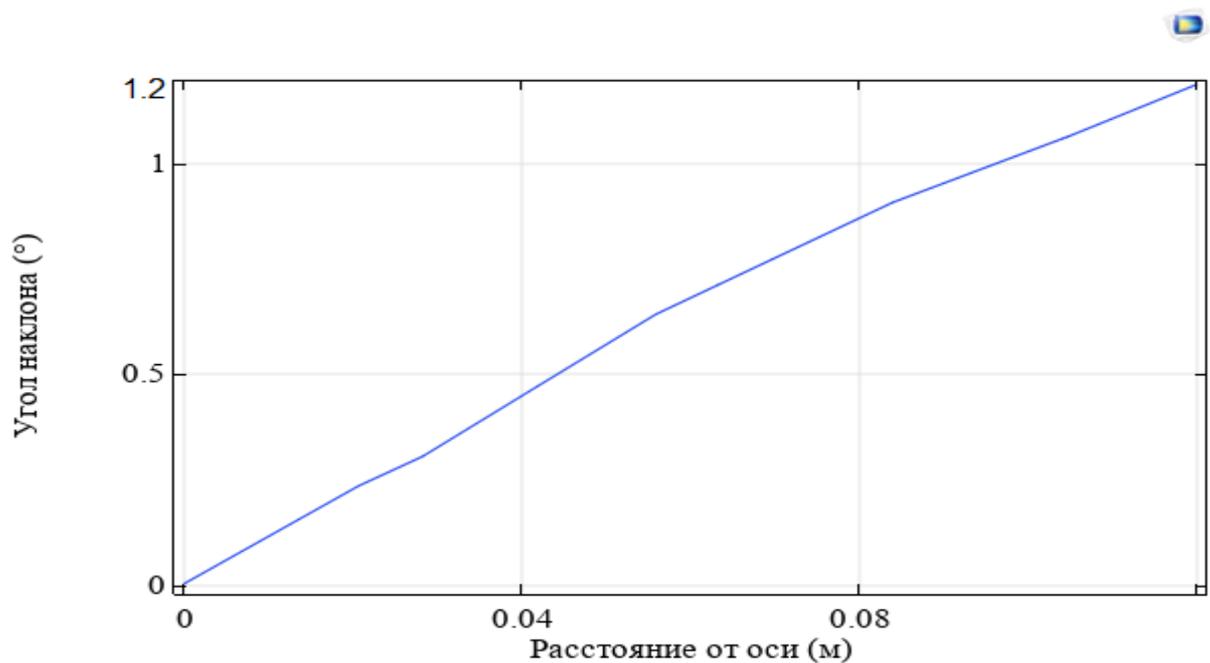


Рис. 1.4.

Зависимость угла наклона от расстояния от оси.

Для диагностики энергий заданного сорта ионов могут быть использованы:

- электростатические анализаторы;
- магнитные анализаторы;
- времяпролётные анализаторы;
- доплеровская спектроскопия, и др;

Для энергии ионов в 3 эВ, времени отсечки 0,1 мс и разрешающей способностью в 1 эВ длина времяпролетного анализатора была бы порядка 10 м. Доплеровская спектроскопия позволяет определить функцию распределения нейтральных атомов исходя из уширения линии, но не

удовлетворяет условию локальности; а также требуют высокой ( $\sim 0,01$  нм) разрешающей способности спектрального прибора. Магнитные анализаторы могут измерить функцию распределения по импульсам, что дает возможность вычислить распределение по энергиям. Но данная диагностика является достаточно громоздкой, что не позволяет проводить измерения с изменением координаты.

В данной работе разрабатывался прототип электростатического анализатора как наиболее технически простой из представленных методов.

## Глава 2. Прототип сеточного ионного анализатора

### 2.1. Метод задерживающего потенциала

На рис. 2.1 показан принцип работы анализатора, основанного на методе задерживающего потенциала. Экран 1 находится под потенциалом плазмы, а на анализирующий электрод относительно экрана подается потенциал  $V$ , который создает задерживающее электрическое поле для анализируемых частиц. Если энергия прошедших через отверстие в экране частиц больше  $qV$ , где  $q$  заряд частицы, то она пройдет через сетку. На коллектор 3 относительно потенциала экрана подается напряжение, препятствующее попаданию на коллектор частиц, знак которых противоположен анализируемым. Коллектор соединен с измеряющим ток прибором 4, что дает возможность измерить значения потока частиц.

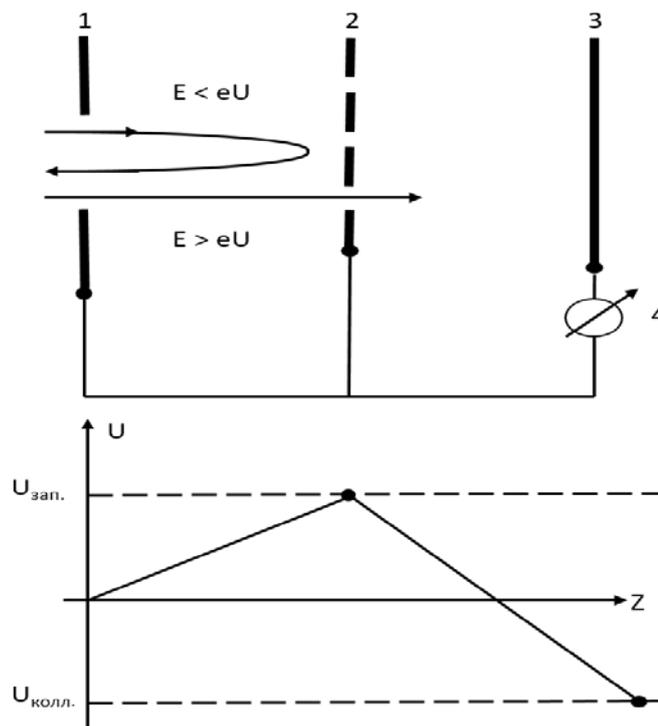


Рис 2.1 Метод задерживающего потенциала

1 – экран, 2 – анализирующий электрод, 3 – коллектор, 4 –измеритель тока.

Полученная информация позволяет получить распределение по энергиям, если известны диаметр отверстия в экране, концентрацию анализируемых частиц и их заряд. Метод задерживающего потенциала является

интегральным, так как как плотность тока, фиксируемая анализатором, равняется:

$$j(eV) = e \int_{eV}^{\infty} f(E') \sqrt{2E'/m_i} dE'; \quad (1)$$

Функция распределения по энергиям получается дифференцированием по  $eV$ :

$$f(E = eV) = -\frac{1}{e} \sqrt{\frac{m_i}{2eV}} \frac{dj(eV)}{d(eV)}; \quad (2)$$

К достоинствам данного метода стоит отнести простоту реализации, а к недостаткам необходимость прикладывать к анализирующему электроду сравнимое с энергией анализируемых частиц напряжение; ошибки в определении функции распределения, связанные с необходимостью численного дифференцирования; провисание электрического поля в анализирующем электроде [10].

## 2.2 Конструкция прототипа анализатора

Размеры диагностических портов и камер установки ограничивают максимальную длину анализатора до 5 см и в диаметр до 2,5 см.

Анализирующий электрод выполнен в виде медной трубки, а не традиционной для данного вида диагностик сетки. Это сделано с целью повышения прозрачности. Отношение радиуса анализирующего электрода к его длине было оптимизировано таким образом, чтобы разброс максимумов задерживающего потенциала по радиусу не превышал 10%.

Для моделирования распределения потенциалов была использована программа COMSOL Multiphysics. В данной среде искомые параметры находятся путем решения дифференциальных уравнений методом конечных элементов. Геометрия нашей задачи допускает использование двумерной аксиально-симметричной модели. Геометрия модели, распределение электростатического потенциала и график зависимости максимума задерживающего потенциала от расстояния от оси симметрии анализатора, обозначенной за  $z$ , представлены на рис. 2.3, 2.4.

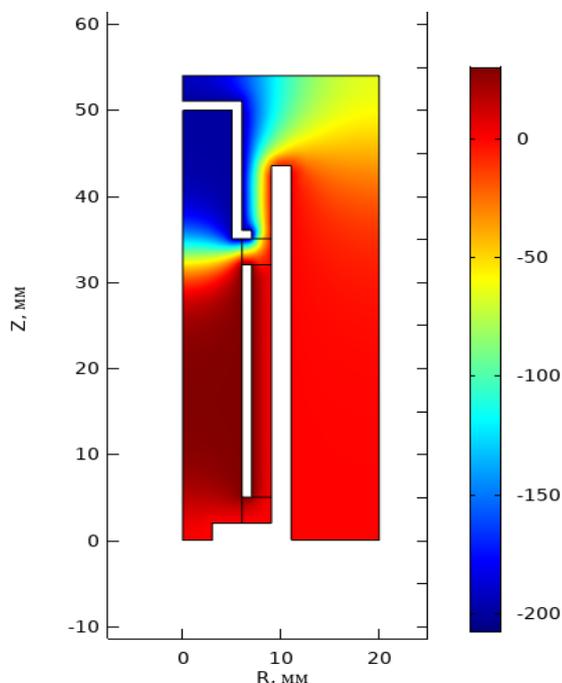


Рис. 2.2.

Двумерное распределение потенциала в анализаторе при напряжении на анализирующем электроде 30В.

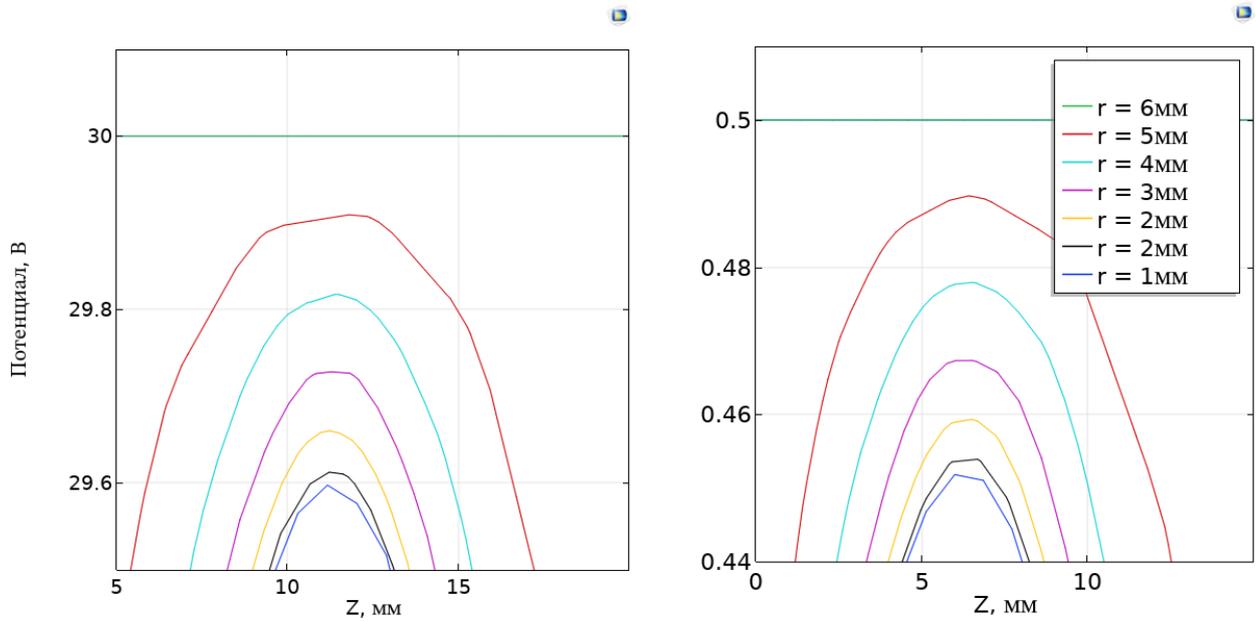


Рис. 2.4.

Разброс максимумов потенциала в зависимости от радиуса для 30 В и 0.5 В.

Как видно из графиков разброс максимумов задерживающего потенциала не превышает 10%.

Корпус анализатора выполнен из нержавеющей стали. В нем и в анализирующем электроде сделаны четыре боковых отверстия для подвода к трубке потенциала и обеспечения вакуумной откачки. Радиус входной апертуры выбран таким образом, чтобы значение собираемого коллектором тока было легко регистрируемо измерительным прибором для напряжений на анализирующем электроде, соответствующих энергии пролетающих частиц. Используя для оценки энергию равной 3 эВ, плотность  $10^{19} \text{ м}^{-3}$ , ток на коллектор 100 мА, получаем радиус апертуры

$$r = \sqrt{I/\pi e * \sqrt{\frac{m_i}{2T_i}}} \approx 3 \text{ мм} \quad (3)$$

Выбор расстояния между краем апертуры и анализирующим электродом обусловлен вращением частиц в магнитном поле. Для его оценки необходимо знать ларморовский радиус иона. Для полей в 30 мТл и температуры ионов 3 эВ получаем следующую оценку:

$$\rho = \frac{m_i v_{\perp}}{eB} \sim \frac{m_i v_{Ti}}{eB} = \frac{\sqrt{2m_i T_i}}{eB} = 12 \text{ мм} \quad (4)$$

Для обеспечения изоляции анализирующего электрода от создаваемого ионами тока расстояние от анализируемого электрода до края апертуры должно быть больше их ларморовского радиуса, однако данное требование невыполнимо в силу упомянутых выше условий, накладываемых размерами диагностических портов. Поэтому было выбрано значения в 3 мм в качестве максимально технически возможного.

Для подавления тока вторичной эмиссии с коллектора был предпринят ряд мер. Во-первых, было решено изготовить коллектор из меди, так как она обладает наиболее низким коэффициентом вторичной эмиссии из технически доступных материалов [11]. Во-вторых, коллектор изготовлен в виде цилиндра Фарадея. В-третьих, к нему было присоединено два постоянных NdFeB магнита с намагниченностью 0,5 Тл для создания линий магнитного поля, приводящих выбитые ионами электроны обратно на коллектор. Создаваемое ими и магнитной системой поле изображено на рис.2.5. Магниты гальванически изолированы от коллектора.

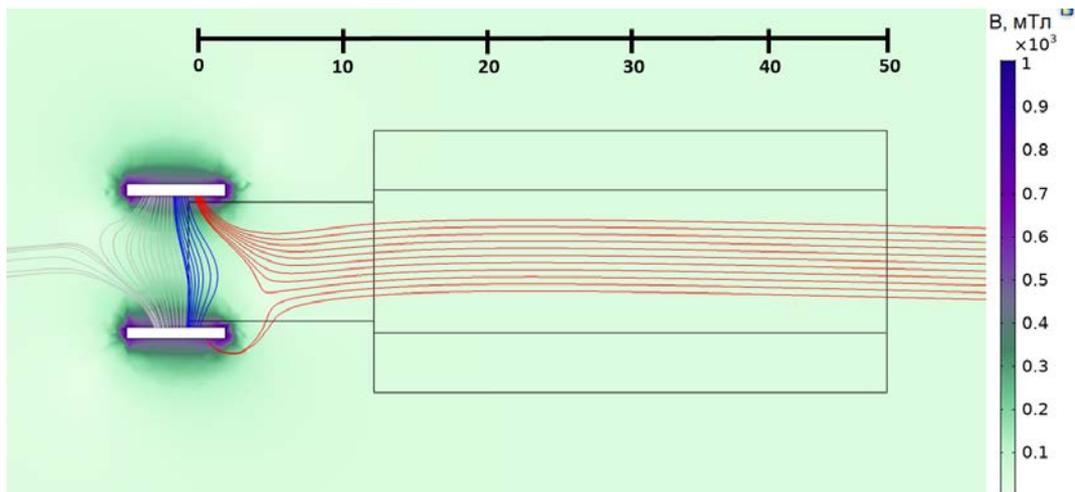


Рис.2.5.

Магнитное поле в окрестностях анализатора.

Красным обозначены силовые линии, проходящие через апертуру, синим - через дно коллектора, серым – начинающиеся за коллектором. Внешнее поле 30 мТл. Силовые линии имеют угол наклона  $1,7^\circ$  к оси анализатора.

В точке излома магнитных линий внутри коллектора напряженность магнитного поля порядка 60 мТл, что соответствует ларморовскому радиусу порядка 6 мм для ионов с энергией 3 эВ. Расстояние от точки излома до коллектора порядка 3 мм. Это значит, что ионы “оторвутся” от силовых линий, обозначенных на рисунке красным, и придут на дно коллектора. Таким образом электроны вторичной эмиссии будут двигаться вдоль проходящий через дно коллектора силовых линий, что замкнет ток вторичной эмиссии внутри него.

Коллектор, корпус и запирающий электрод отделены друг от друга изоляционными кольцами из полиэфирэфиркетона. Чертеж анализатора в разрезе представлен на рис.2.6 вместе с размерами.

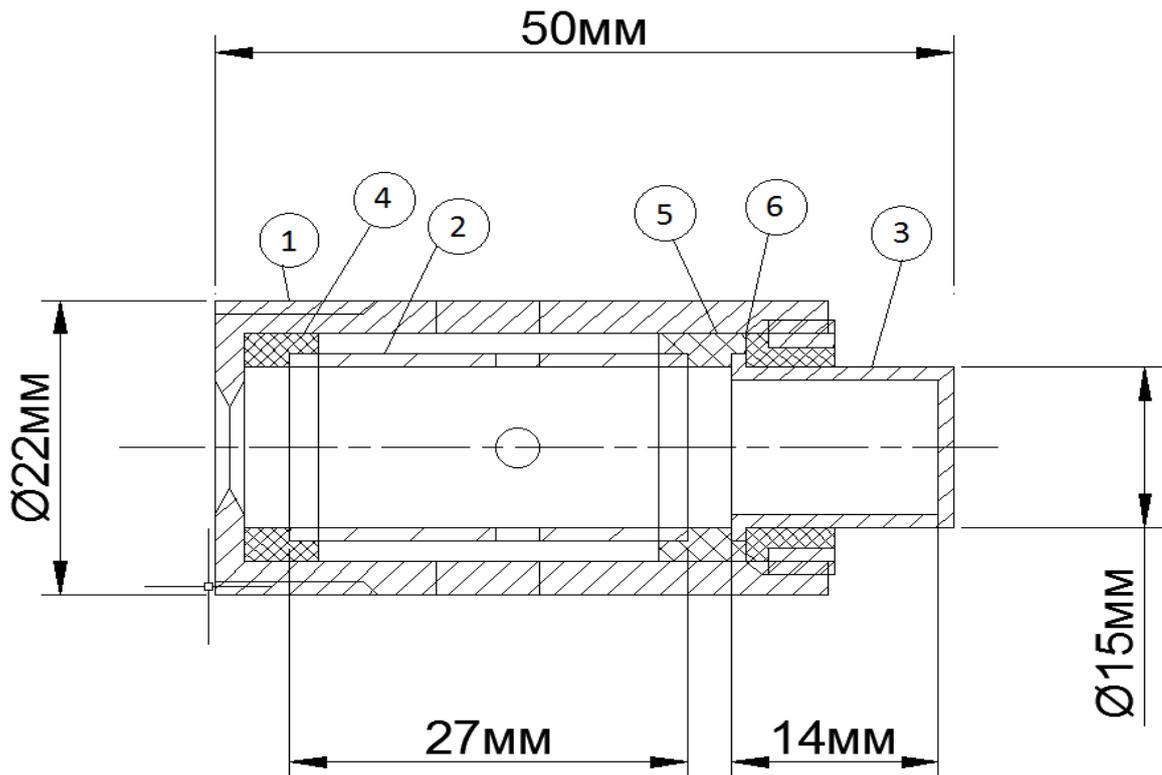


Рис. 2.6.

Чертеж устройства.

1 – корпус, 2 – анализирующий электрод, 3 – коллектор, 4,5,6 – изоляционные кольца.

### 2.3 Схемы регистрации и питания

Корпус анализатора помещен в плазму напрямую и находится под плазменным потенциалом. Потенциал корпуса для данной схему считаем за нуль. На анализирующий электрод было решено подавать переменное напряжение. Это связано с тем, что существует временной отрезок порядка 100 мс, когда параметры плазмы меняются достаточно медленно, что дает возможность производить измерения в некотором диапазоне запирающего напряжения за один выстрел.

Схема проведения измерений представлена на рис. 2.7.

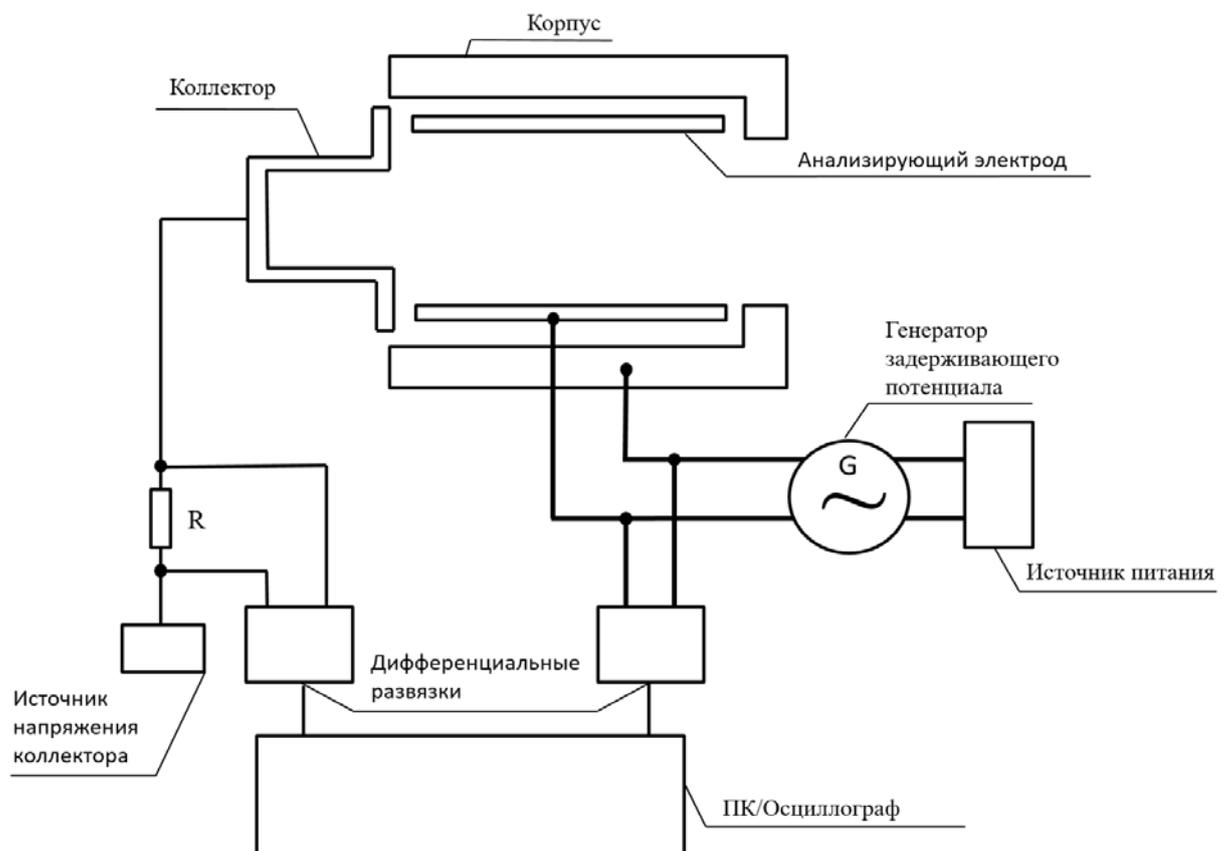


Рис. 2.7.

Схема измерений.

Ток, приходящий на коллектор, регистрируется в виде падения напряжения на резисторе  $R$  с сопротивлением 10 Ом с помощью дифференциальной развязки TESTEK TT-SI 9001. С помощью такой же развязки регистрируется напряжение между корпусом и запирающим электродом. Сигналы с развязок идут на ПК или осциллограф, где сохраняются для дальнейшей обработки.

Для подачи данного напряжения был создан генератор переменного, работающий на базе генератора Мейснера и усилителя сигнала. Схема представлена на рис.2.8.

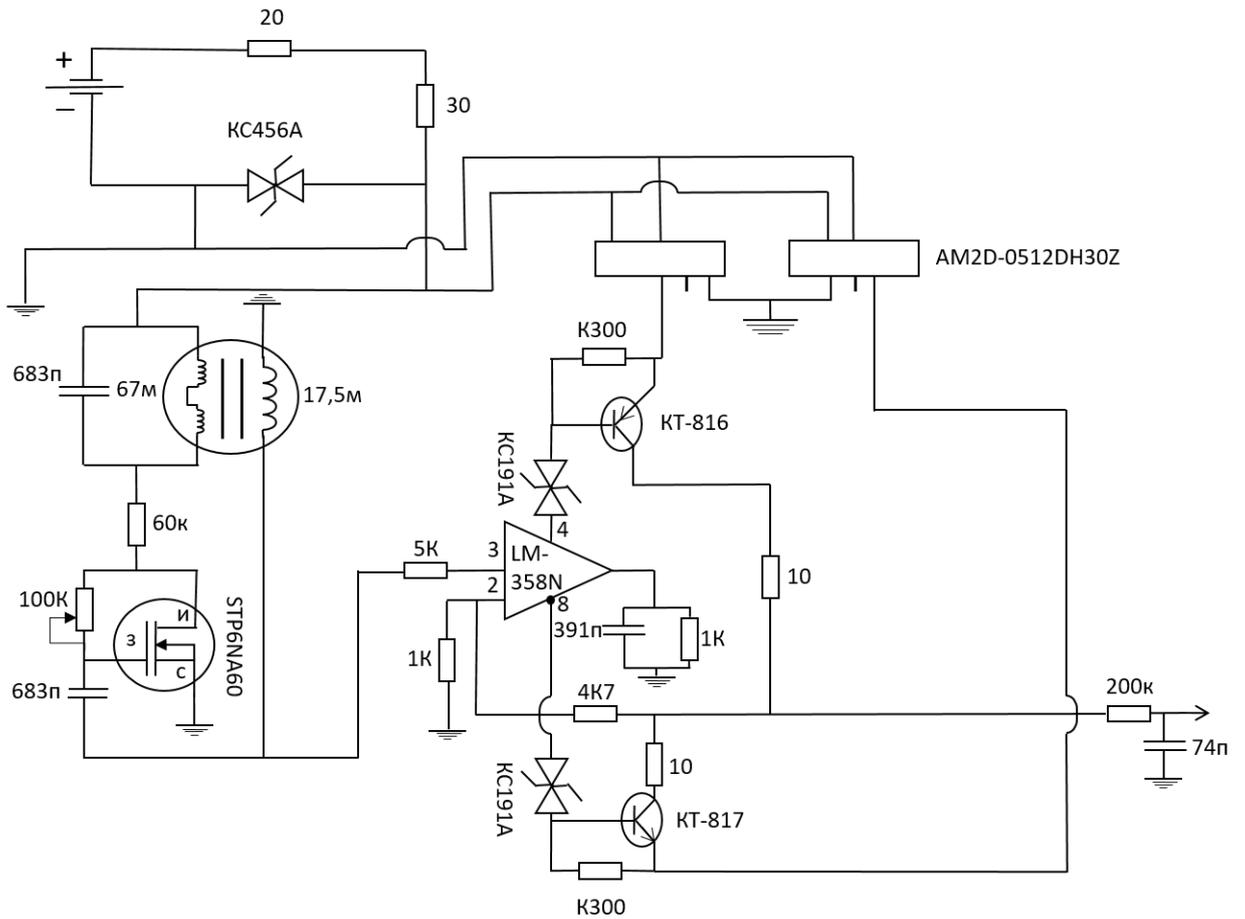


Рис. 2.8

Схема генератор запирающего напряжения.

Частота генерации 2,5 кГц, амплитуда 20В. Питается данная схема от батареи питания напряжением 9В.

На коллектор подается напряжение до -200В с помощью источника постоянного напряжения.

## Глава 3. Результаты измерений

### 3.1 Обработка данных

Исходные данные до обработки представляют собой две зависимости  $J(t)$ ,  $U(t)$ . Для решения задачи построения был предложен следующий алгоритм обработки:

1. Фильтрация  $U(t)$ ,  $I(t)$ ;
2. Выбор промежутка времени;
3. Построение ВАХ анализатора;
4. Построение аналитической кривой методом наименьших квадратов;
5. Вычисление производной от аналитической кривой;
6. Подстановка производной от полученной пунктом выше аналитической функции в формулу 2.

Предполагая функцию распределения максвелловской вида  $f(E) = \frac{2\pi}{\sqrt{\pi T_i}^3} \sqrt{E} \exp(-\frac{E}{T_i})$  из формулы 1 получаем следующий вид ВАХ:

$$J = Sj(U) = eS \int_{eU}^{\infty} f(E') \sqrt{2E'/m_i} dE' = 4eS \sqrt{\frac{2}{\pi m_i}} \sqrt{T_i} (1 + \frac{eU}{T_i}) \exp(-\frac{eU}{T_i}); \quad (5)$$

Алгоритм реализуется на языке Matlab.

### 3.2 Анализ измерений

Ниже приведены результаты измерений, полученных в эксперименте при установке датчика в точке с радиальной координатой  $r = 120$  мм.

График зависимости тока на коллектор и напряжения на анализирующем электроде представлен на рис. 3.1.

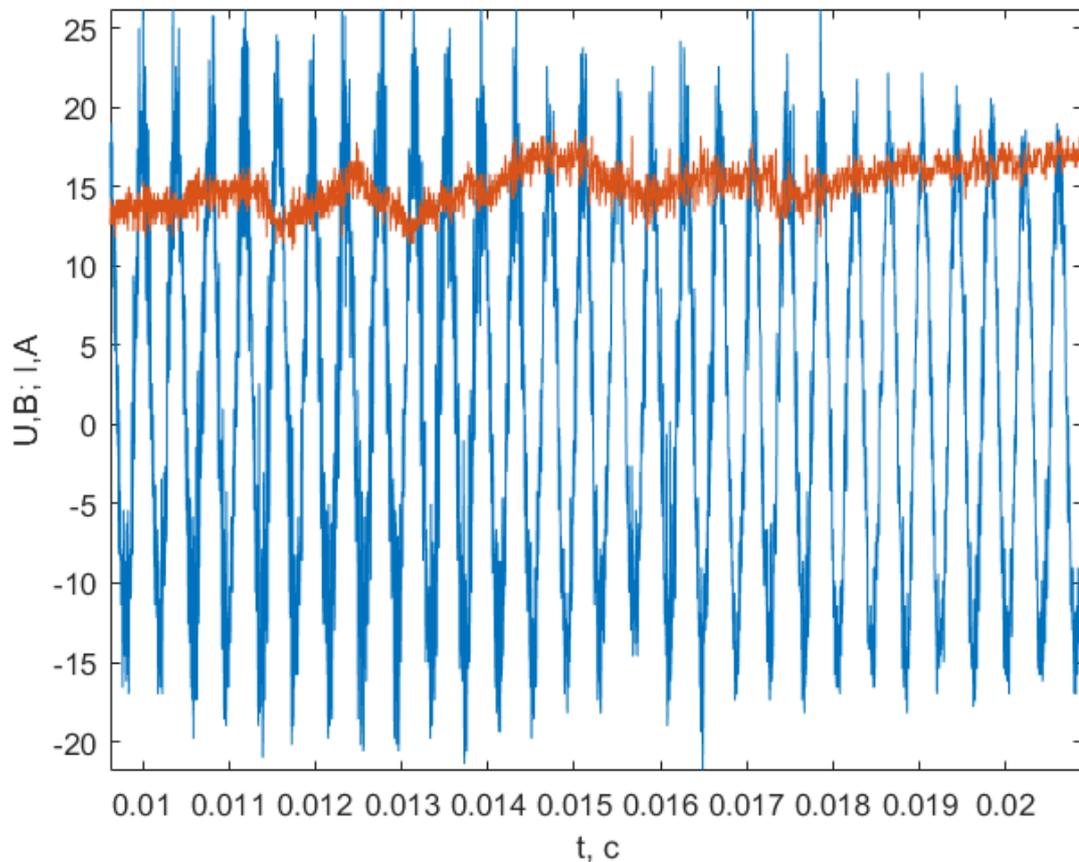


Рис. 3.1

Зависимость анализирующего напряжения и тока на коллектор от времени.

Ток обозначен оранжевым, напряжение – синим.

Данный график иллюстрирует одно из основных упущений, допущенных при проектировке анализатора – внешняя поверхность коллектора, находящаяся в тени диагностики, регистрирует ненулевой ток ионов. Данный ток не зависит от потенциала на анализирующем электроде и медленно изменяется во времени. Постоянная составляющая может быть устранена при использовании входного фильтра высоких частот. В то же время, наличие тока на внешнюю поверхность коллектора приводит к высокому уровню наводок в измеряемом сигнале, что затрудняет обработку. Потенциал коллектора с учётом наличия постоянного тока составляет  $\sim -70$  В, что достаточно для регистрации ионов.

Зависимости тока на коллектор и анализирующего напряжения от времени при использовании входного фильтра высоких частот при установке датчика в точке с радиальной координатой  $r = 0$  мм приведены на рис. 3.2.

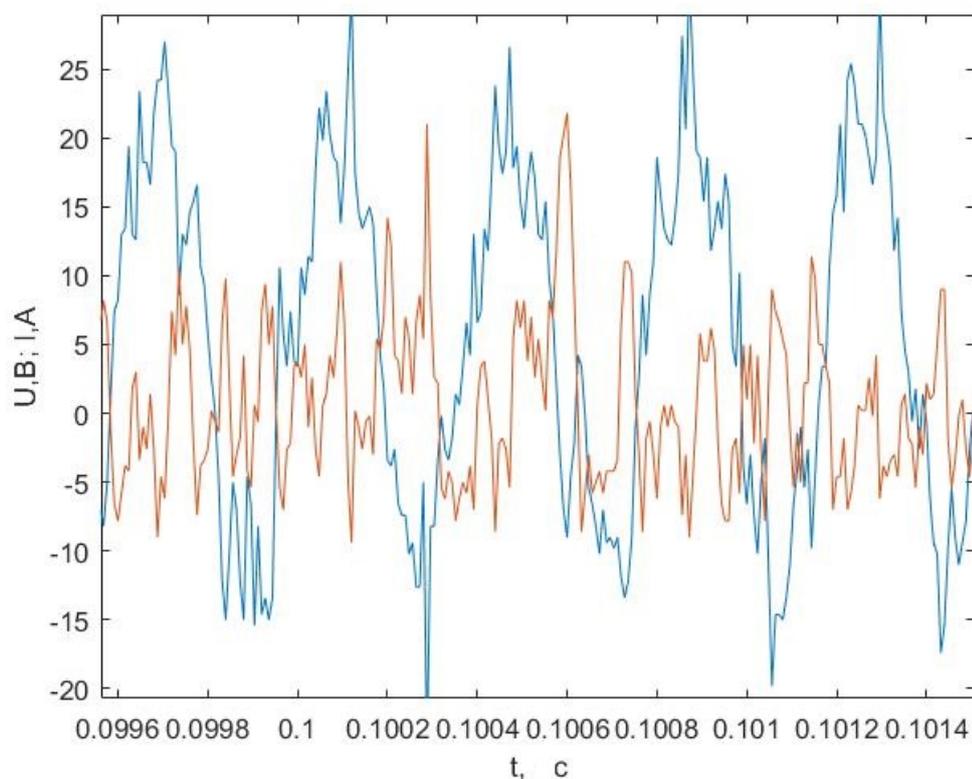


Рис. 3.2.

Зависимость анализирующего напряжения и тока на коллектор от времени на оси установки. Ток для наглядности увеличен в 5 раз.

Как видно из графика в данной координате ток на анализирующий электрод понижает задерживающий потенциал, что не является критичным, но наталкивает на идею использовать более мощный генератор. Так же заметны совпадающие гармоники в сигналах тока и напряжения. Это подтверждает Фурье-анализ, представленный на рис. 3.3.

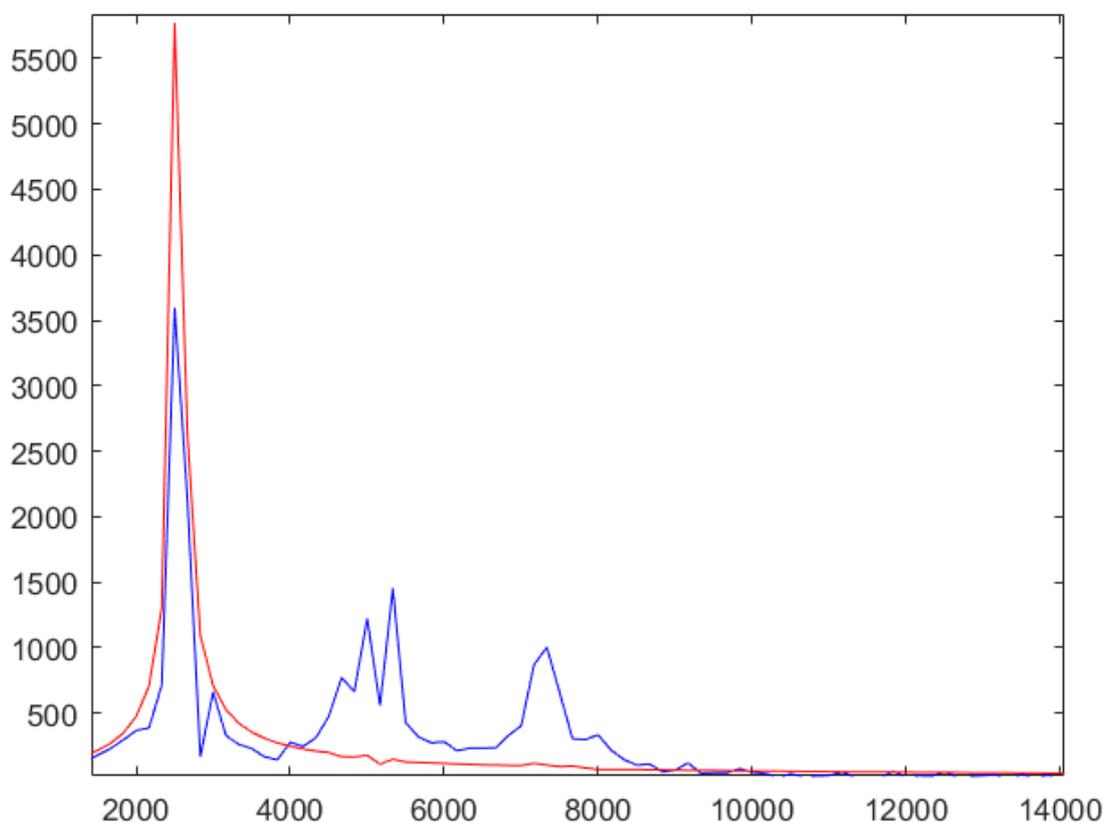


Рис. 3.3. Спектр тока на коллектор и задерживающего напряжения. Для наглядности спектр тока увеличен в 200 раз.

Как видно есть отклик на частоте генерации задерживающего напряжения, и на второй и третьих гармониках, что ожидаемо, т.к. ВАХ анализатора должна быть нелинейной.

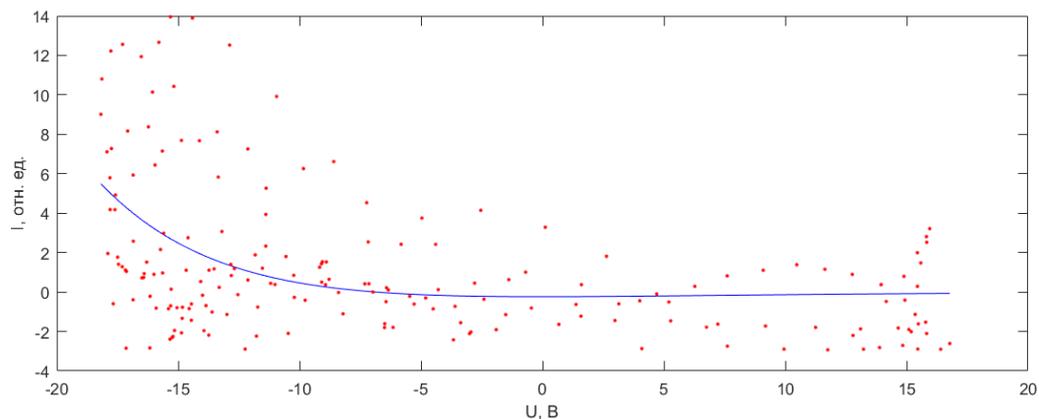


Рис. 3.4. Вольт-амперная характеристика анализатора в выходном расширителе в точке с радиальной координатой  $r = 0$  мм. Вписана аналитическая кривая вида (5) с параметром  $T_i = 6,9$  эВ

ВАХ анализатора приведена на рис. 3.4. ВАХ описывается аналитической кривой вида (5), полученное при аппроксимации значение свободного параметра  $T_i = 6,9$  эВ. Указанное значение является физически осмысленным и соответствует исходным предположениям. В то же время, уровень наводок является предельно высоким, что не даёт возможности делать вывод о высокой достоверности измеренных значений.

Дальнейшее использование диагностики для измерения функции распределения требует доработки конструкции и измерительной схемы.

## **Заключение**

В результате работы был спроектирован и собран ионный анализатор. Проведены необходимые оценки и вычисления, обосновывающие выбор параметров анализатора и экспериментальных условий, в которых данная диагностика может быть применена.

Построен алгоритм обработки результатов на языке Matlab.

Проведен анализ результатов, указывающий на принципиальную возможность проводить измерения с помощью данного анализатора. Указанное значение соответствует исходным предположениям. Выявлены необходимые улучшения, необходимые для корректной работы данной диагностики, внесение которых может стать темой для дальнейших исследований.

## Список литературы

1. Арцимович Л. А. Управляемые термоядерные реакции. — М.: Физматлит, 1961. — 15 с.
2. Иванов А. А., Приходько В. В. Газодинамическая ловушка: результаты исследований и перспективы // УФН. — 2017. — Т. 187, 5. — С. 547-574.
3. T.C.Simonen, A.Anikeev, P.Bagryansky, A.Beklemishev, A.Ivanov, A.Lizunov, V.Maximov, V.Prikhodko, Yu.Tsidulko, High beta experiments In the GDT axisymmetric magnetic mirror, J. Fusion Energy 29 (2010) 558–560.
4. Бурдаков А.В., Поступаев В.В. Многопробочная ловушка: путь от пробкотрона Будкера к линейному термоядерному реактору // УФН. — 2018. — Т. 188, 6. — С. 651-671.
5. Budker, G. I., V. V. Mironov, and D. D. Ryutov. "Gas dynamics of a dense plasma in a corrugated magnetic field." In Collection of papers. (1982).
6. Ilan Be'ery et al, Plasma Phys. Control. Fusion, in press (2018).
7. A.D. Beklemishev, Helicoidal system for axial plasma pumping in linear traps, Fusion Sci. Technol. 63 (1T) (2013) 355–357A. D. Beklemishev, Fusion Sci. Technol, 63 (No. 1T), 355 (2013).
8. A. D. Beklemishev, Helical plasma thruster, Phys. Plasmas 22 (2015) 103506. DOI: 10.1063/1.4932075
9. T.D. Akhmetov, V.I. Davydenko, A.A. Ivanov, G.I. Shulzenko, A.Kreter, B.Unterberg, Studies of plasma production in a linear device with plane LaB<sub>6</sub> cathode and hollow anode, AIP Conference Proceeding 1771, 070003 (2016)
10. Ю.В. Готт, В.А Курнаев., О.Л. Вайсберг, Корпускулярная диагностика лабораторной и космической плазмы, - М: МИФИ, 2008. с.11.
11. Akira Takagi. Ion sources // <http://slideplayer.com/slide/4452593/>.