

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

Матрошилов Никита Олегович

(Фамилия, Имя, Отчество автора)

Тема работы: Измерение ширины аппаратной функции щелевого электростатического анализатора

«К защите допущена»

Заведующий кафедрой

ученая степень, звание

должность, место работы

...../.....

(фамилия И., О.) / (подпись, МП)

«.....».....20...г.

Научный руководитель

м.н.с. ИЯФ СО РАН

Коробейникова О. А./.....

(фамилия И., О.) / (подпись, МП)

«.....».....20...г.

Дата защиты: «.....».....20...г.

Новосибирск, 2022

Оглавление

Введение.....	3
Экспериментальная установка.....	5
Ионный источник.....	7
Щелевой анализатор.....	11
Эксперимент.....	15
Эксперименты с ионным источником.....	15
Эксперименты с щелевой пластиной.....	21
Заключение.....	25
Список литературы.....	26

Введение

В настоящее время в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера – (ИЯФ СО РАН) осуществлен физический пуск новой экспериментальной установки для магнитного удержания плазмы – Компактный Осесимметричный Тороид (КОТ) [1]. Особенностью эксперимента является наличие плазмы с высоким относительным давлением $\beta^1 \sim 1$ и возможным обращением ведущего магнитного поля – FRC (Field Reversed Configuration) [2]. Для успешной работы установки в данном режиме требуется стартовая плазма с температурой электронной компоненты 40-50 эВ и плотностью 10^{13} см⁻³. Установка относится к типу открытых магнитных систем, в которых плазма свободно вытекает вдоль силовых линий магнитного поля через магнитные пробки [3, 4]. Необходимым условием получения высокой электронной температуры мишенной плазмы является развитие неустойчивости Кельвина – Гельмгольца при работе плазменного генератора. При этом температура ионной компоненты может достигать 200 эВ [5].

С целью изучения функции распределения энергетического спектра ионной компоненты планируется использовать сеточный энергоанализатор нового типа, разработанный в ИЯФ СО РАН [6]. В анализаторе используется щелевая пластина на месте одной из задерживающих ионы сеток, геометрия пластины подобрана специально так, чтобы она пропускала только ионы в узком диапазоне энергий. Таким образом, анализатор позволяет получать энергетический спектр ионов без необходимости использования процедуры дифференцирования сигнала по энергии, что значительно снижает амплитуду ВЧ шума в спектре регистрируемого сигнала при минимальной модификации самого анализатора.

¹ $\beta = \frac{8\pi P_{\perp}}{B^2}$ – отношение давления плазмы к давлению магнитного поля

В данной работе была проведена калибровка анализатора с установленной щелевой пластиной с помощью разработанного нами монохроматического ионного источника. Ионный источник был изготовлен на базе ионизационной лампы ПМИ-27, в которой ионизация производится электронным ударом. Источник отличается простотой конструкции и позволил получить яркий пучок ионов с достаточно узким энергетическим спектром $\frac{\Delta E}{E} < 3\%$. Целью работы являлось экспериментальное подтверждение работы электростатического анализатора с щелевой пластиной, а также измерение ширины аппаратной функции такого анализатора.

Экспериментальная установка

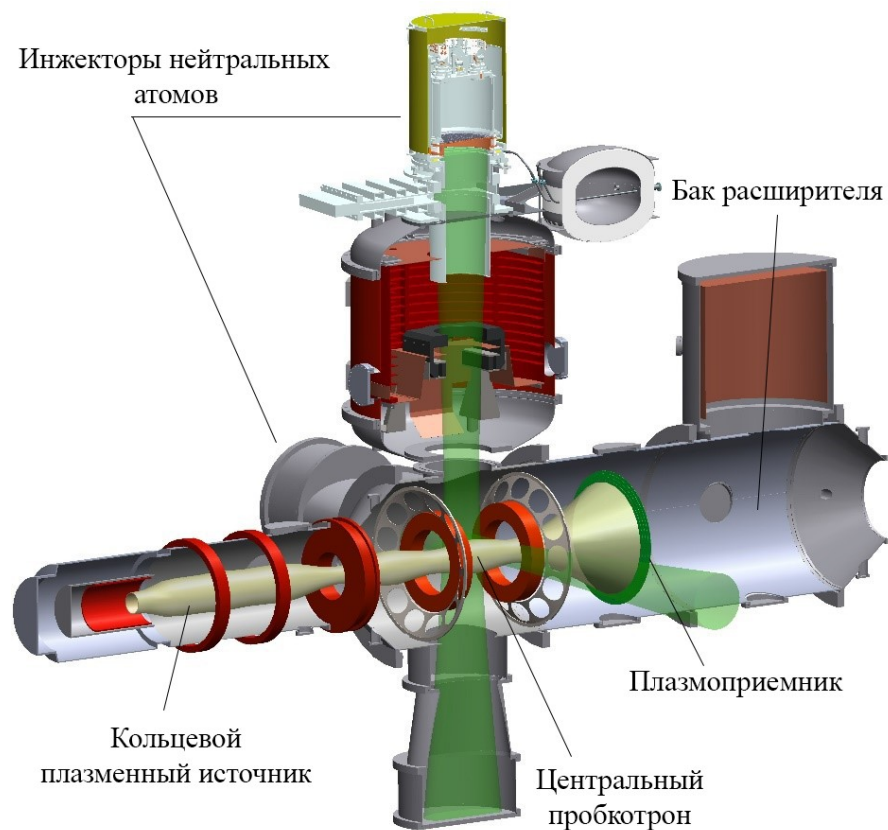


Рисунок 1. Компактный Осесимметричный Торонд.

Ионный источник и сеточный анализатор расположены в вакуумной секции за плазмоприемником экспериментальной установки КОТ (рис.1), разработанной в ИЯФ СО РАН. Установка КОТ относится к открытым осесимметричным ловушкам для удержания плазмы в магнитном поле, в которых плазма покидает область удержания вдоль силовых линий магнитного поля. На установке КОТ предполагается удерживать плазму с высоким относительным давлением $\beta \sim 1$ в осесимметричном пробкотроне малого объема. Стартовая плазма плотностью до $5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ образуется при работе кольцевого газоразрядного источника, аналогичного источнику установки АМБАЛ-М [7]. Наличие радиального электрического поля в дуговом канале источника плазмы приводит к развитию неустойчивости Кельвина-Гельмгольца, в результате чего ионная компонента плазмы

нагревается до 200 эВ. Формирование термобарьера позволяет электронной компоненте в центральном пробкотроне нагреваться до температур порядка 50 эВ за счет передачи энергии по кулоновскому каналу.

Инжекция атомарных пучков суммарной мощностью 3 мВт в нижнюю область центрального пробкотрона приводит к тому, что захваченные быстрые ионы способны создавать компактное тороидальное образование с плотностью 10^{13} см^{-3} и средней энергией ионов 9 кэВ. Расчеты показывают, что при достаточно горячей стартовой плазме и при достаточно большом накопленном азимутальном токе диамагнетизм образования достаточен для обращения ведущего магнитного поля, при этом реализуется конфигурация с обращенным полем [8]. Эксперименты, проведенные в прошлом на установке АМБАЛ-М показали, что энергия ионов, покидающих область удержания, составляет порядка 200 эВ. Схожесть с АМБАЛ-М позволяет ожидать подобные параметры ионной компоненты плазмы и на установке КОТ.

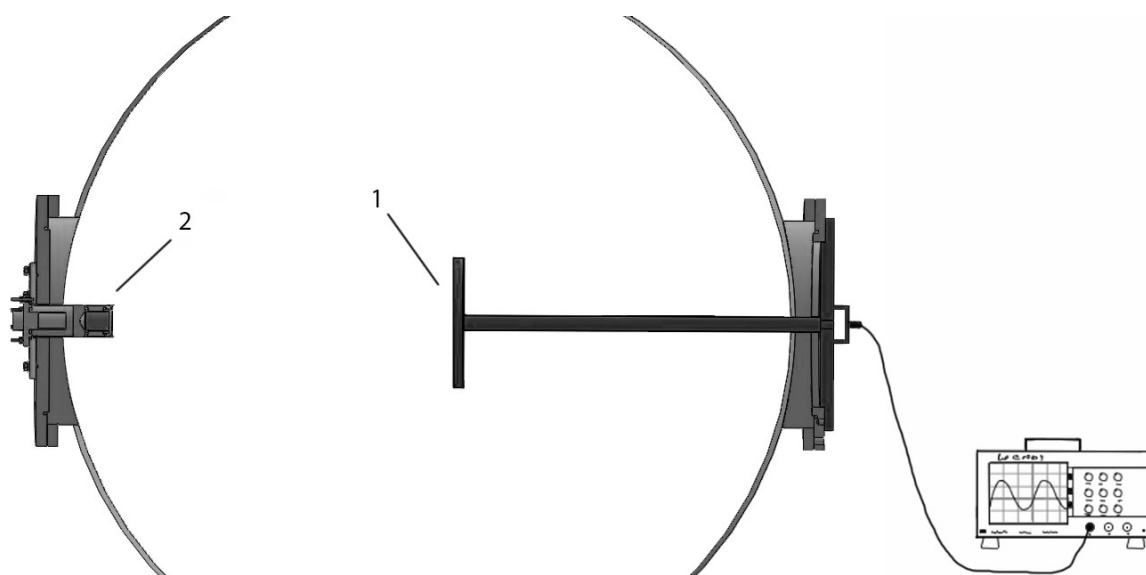


Рисунок 2. Сечение бака расширителя установки КОТ. 1 – анализатор, 2 – ионный источник.

Для изучения энергетического спектра ионов, покидающих область удержания планируется использовать новый щелевой энергоанализатор. Перед проведением полноценных измерений необходимо провести его калибровку ионами с известной энергетической функцией распределения.

Для этой цели был создан монохроматический ионный источник, а на время калибровки оба устройства были помещены в бак расширителя установки КОТ, которая используется в качестве вакуумного стенда. На рис.2 изображено сечение бака расширителя установки КОТ, на котором изображено относительное расположение ионного источника и энергоанализатора, а также регистрирующая аппаратура. Сигнал с ионного источника, без предварительного усиления, попадает на один из каналов осциллографа через щуп сопротивлением 1МОм.

Ионный источник

Любой ионный источник содержит две обязательные части – генератор ионов и ионно-оптическую систему, которая транспортирует и формирует пучок ионов. При конструировании источника прежде всего необходимо определиться с тем, каким именно образом будут производиться ионы. Существует множество способов получения ионов в источниках различных конструкций. Часто для ионизации газа используется электронный удар, а сами источники отличаются способом получения и ускорения этих электронов. К основным источникам электронов для ударной ионизации можно отнести: термоэмиссионные катоды, лазерное облучение катода с низкой работой выхода, ионизация газа радиоактивным источником. Также широко распространено использование радиочастотного или микроволнового пробоя газа на частоте электронно-циклотронного резонанса, приводящего к образованию плазмы. Детально эти способы описаны в [9].

Наиболее важным требованием к калибровочному источнику ионов являлась максимально простая конструкция, обеспечивающая ток порядка 1 мкА с энергией частиц до 1 кэВ. Немаловажным фактором, ограничивающим выбор генератора ионов, являлась доступность деталей, а также разумные размеры готового устройства. Всем этим требованиям хорошо соответствует источник на базе ионизационной лампы схемы Байарда-Алперта [10], в

котором ионизация газа производится электронным ударом. Такой источник является достаточно стандартным, хорошо изученным устройством, которое позволяет получать слаботочные (единицы мкА) пучки ионов. Кроме того, в ИЯФ уже создавался ионный источник на базе лампы Байарда-Алперта, но с энергией частиц 40 кэВ, который показал свою работоспособность [11].

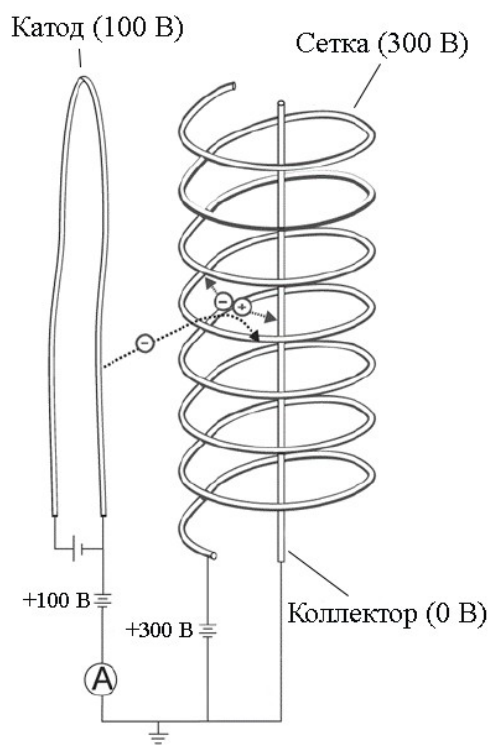


Рисунок 3. Схема лампы Байарда-Алперта.

В качестве основы калибровочного ионного источника была выбрана манометрическая ионизационная лампа ПМИ-27 (рис.3). В паспортных данных прибора указано, что ПМИ-27 пригодна для измерения давления в диапазоне от 10 до 10^{-8} Па. Лампа имеет два режима работы: в высоком вакууме (от 10^{-2} до 10^{-8} Па) и низком вакууме (от 10^{-3} до 10 Па) [12]. В зависимости от режима работы изменяется и схема подключения электродов лампы и, соответственно, траектории движения заряженных частиц внутри лампы. Однако принцип работы в обоих режимах остается общим.

Катод из иридиевой проволоки нагревается током, в результате чего с его поверхности эмитируются электроны. Эмитированные электроны ускоряются электрическим полем внутри лампы, что приводит к ударной ионизации молекул газа в межэлектродном пространстве. Возникающий ионный ток собирается на одном из электродов лампы, а величина этого тока прямо пропорциональна давлению в лампе. Отличительной чертой схемы Байарда-Алперта, которая соответствует режиму высокого вакуума ПМИ-27, является большое время жизни электрона в межэлектродном пространстве, что увеличивает эффективность образования ионов.

В данной работе лампа используется в качестве генератора ионов, поэтому некоторая часть образовавшихся ионов вытягивается из области над сеткой ионно-оптической системой, которая формирует и ускоряет пучок (см. рис.4).

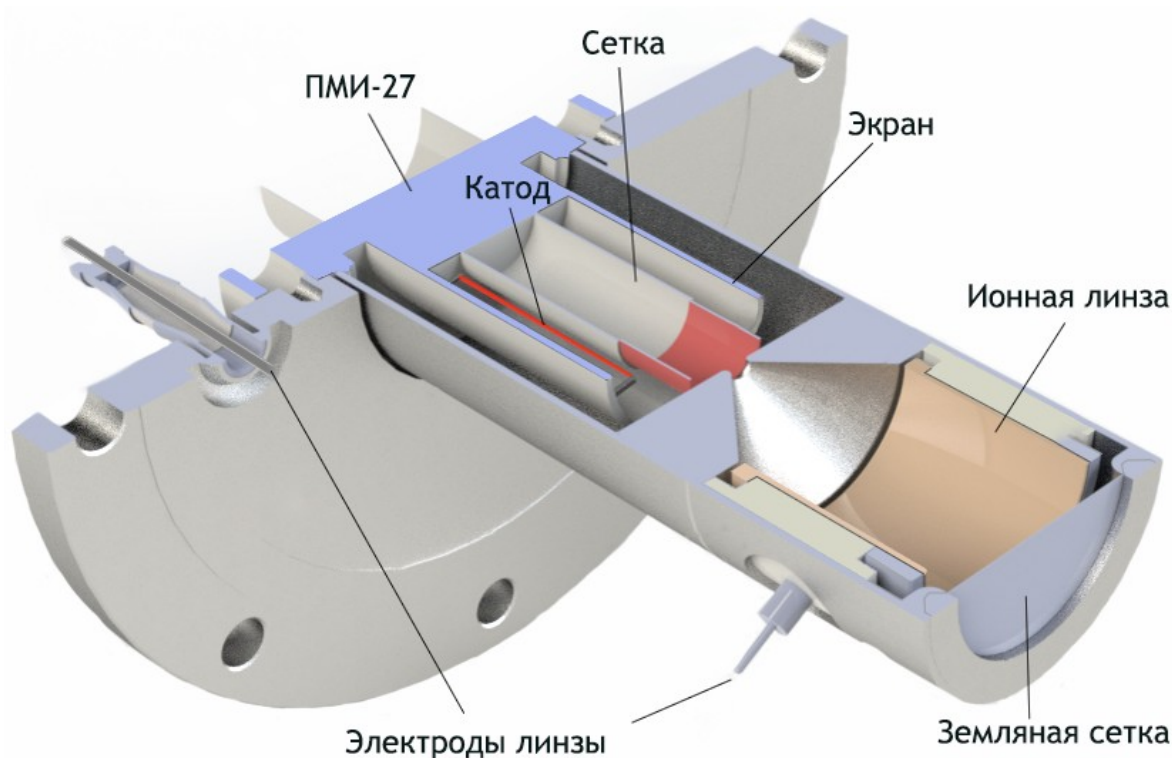


Рисунок 4. Калибровочный источник ионов на базе ПМИ-27.

Ионно-оптическая система источника состоит из сетки и электростатической линзы, вместе они обеспечивают ускоряющий градиент потенциала и формируют пучок. Параметры ионно-оптической системы были подобраны на основании численного расчета в программе CST Studio и обеспечивали требуемую энергетическую монохроматичность частиц и малую угловую расходимость (см. рис.5). Калибровочный источник должен иметь достаточно узкий энергетический спектр с относительной шириной менее 5%. Такое значение получено на основании численной оценки минимальной ширины аппаратной функции щелевого анализатора.

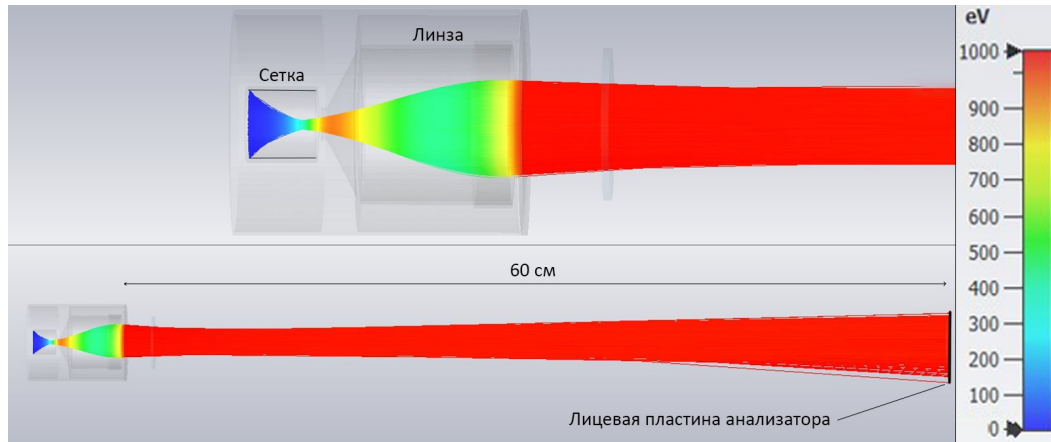


Рисунок 5. Компьютерное моделирование ионно-оптической системы источника с энергией частиц 1 кэВ. Напряжение на линзе 650 В.

Также для ионного источника была разработана и собрана схема питания (рис.6), обеспечивающая ускорение ионов до требуемой энергии. Относительные напряжения на электродах лампы соответствуют паспортным значениям ПМИ-27 для работы в высоком вакууме, однако все они сдвинуты относительно земли на величину ускоряющего напряжения. Максимальная энергия частиц в источнике ограничена электрической прочностью изолятора ионной линзы, а также электропрочностью других элементов лампы, находящихся под большим напряжением. Максимально достижимая энергия ионов не измерялась, но составляет как минимум 1 кэВ.

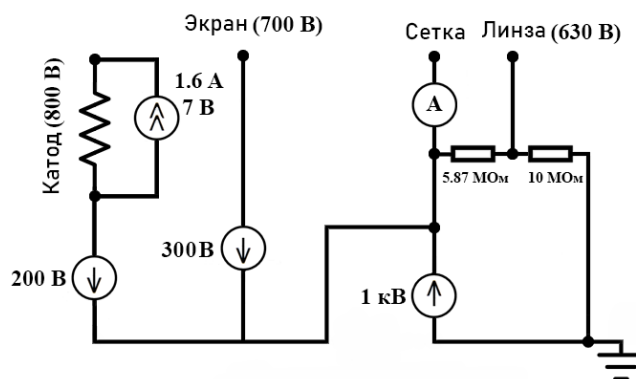


Рисунок 6. Схема питания ионного источника.

Щелевой анализатор

Щелевой анализатор представляет собой модифицированный сеточный анализатор, в котором сепарирующая сетка заменена на щелевую пластину специальной геометрии.

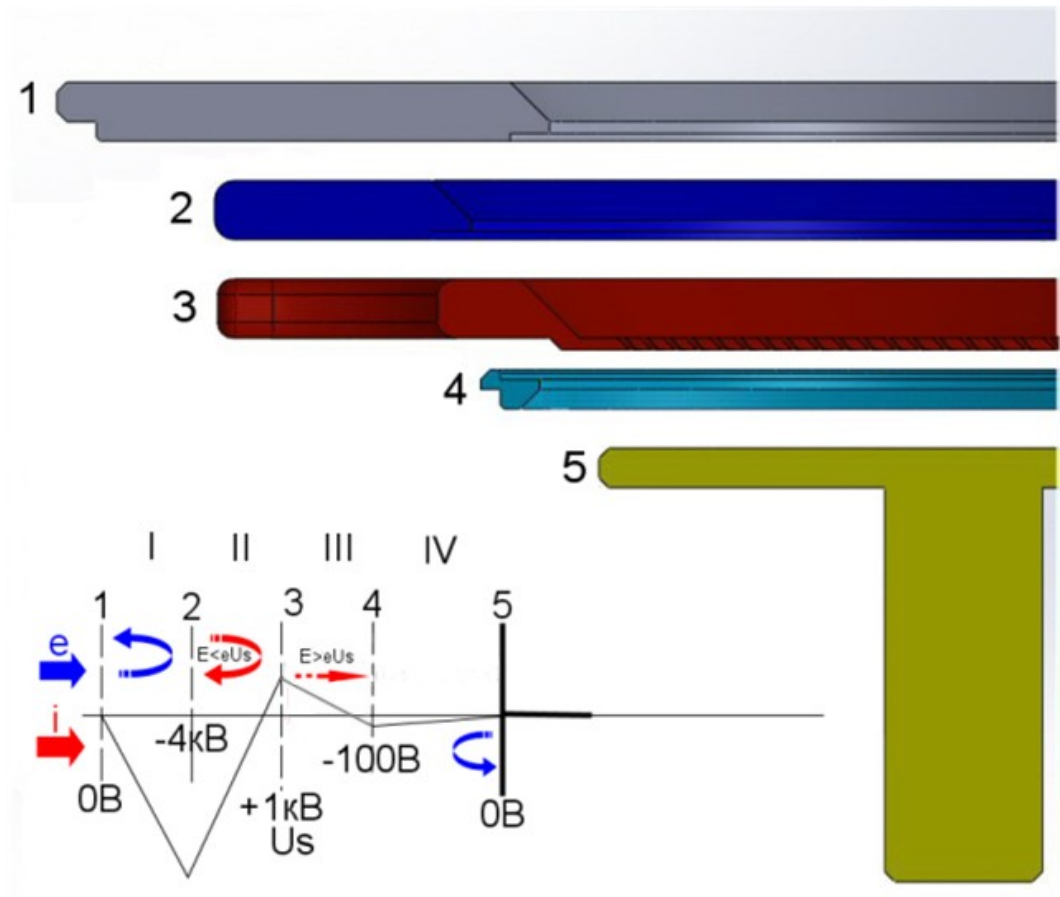


Рисунок 7. Схематическое изображение устройства классического сеточного анализатора ион.

На рис.7 приведена схема классического сеточного анализатора. Первая сетка (1) служит для экранирования внутренностей анализатора от потенциала налетающей плазмы. Электронная сетка (2) отражает электроны, налетающие из плазмы. Сепарирующая сетка (3) пропускает ионы только с энергией выше величины потенциального барьера на ней. Сетка (4) служит для запираения электронов, выбитых из коллектора (5) налетающими ионами.

Запишем плотность ионного тока, попадающего на коллектор. Пусть ионы со скоростью v налетают на поверхность анализатора по нормали, это является обоснованным предположением, поскольку $E_{\perp} \ll E_{\parallel}$ в пучке ионов.

$$j = en \int_{v_{min}}^{\infty} v f(v) dv = \frac{en}{m} \int_{e\varphi}^{\infty} f(E') dE', \text{ где } v_{min} = \sqrt{\frac{2e\varphi}{m}}, \varphi - \text{ потенциал сетки (3), } f -$$

функция распределения ионов.

Дифференцируя плотность тока по потенциалу сетки, получим:

$$\frac{dj}{d\varphi} = \frac{-e^2 n}{m} f(e\varphi).$$

Таким образом, варьируя напряжение на сепарирующей сетке, можно получить зависимость ионного тока от напряжения, тем самым просканировав налетающий поток ионов по интересующему диапазону энергий. После чего необходимо продифференцировать полученный сигнал по энергии для определения энергетического спектра ионов.



Рисунок 8. Щелевая пластина, смонтированная на анализатор.

В ИЯФ СО РАН был разработан аналог сепарирующей сетки – щелевая пластина. Пластина имеет набор параллельных косых щелей, расположенных под углом к плоскости пластины. Как будет показано далее, такая геометрия позволяет пропускать ионы лишь в узком диапазоне энергий. Для

выравнивания потенциала на внешней поверхности пластины прикреплена металлическая сетка. На рис.8 представлена фотография установленной щелевой пластины, а на рис.9 приведено сечение одной из щелей и компьютерная симуляция, показывающая траектории ионов внутри пластины.

Аналогично сепарирующей сетке, на пластину подается сканирующее напряжение. Ионы, имеющие недостаточную для преодоления потенциального барьера энергию $E < e\varphi$, отражаются от пластины и не регистрируются. Частицы с энергией $E > e\varphi + \Delta E$ не успевают затормозиться потенциалом пластины и нейтрализуются на стенке щели, в результате чего такие ионы уже не вносят вклад в коллекторный ток. Лишь частицы, попадающие в диапазон энергий ΔE , проходят через пластину благодаря слабому электрическому полю внутри канала, которое вытягивает их из него.

Запишем плотность тока ионов на коллектор в этом случае:

$$j = \frac{en}{m} \int_{e\varphi}^{e\varphi + \Delta E} f(E') dE', \text{ где } \Delta E \text{ – энергетическое разрешение щелевой}$$

пластины.

Разложим это выражение вблизи сканирующего напряжения:

$$j = \frac{en}{m} f(e\varphi) \Delta E.$$

Видно, что ионный ток на коллектор прямо пропорционален функции распределения ионов по энергиям, что снимает необходимость дифференцирования исходного сигнала.

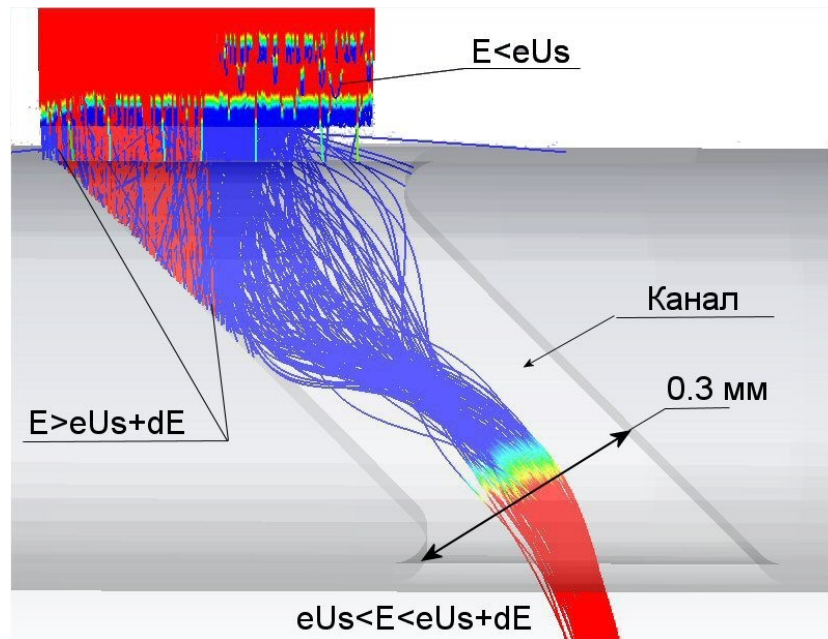


Рисунок 9. Щелевая пластина в разрезе. Показаны траектории движения частиц внутри канала.

Таким образом, предложенная нами новая схема щелевого анализатора позволит заметно улучшить отношение сигнал/шум в планируемых экспериментах по изучению продольного истечения плазмы в установке КОТ.

Эксперимент

Экспериментальная работа проводилась в два этапа. Первым этапом была сборка и отладка ионного источника, определение его рабочих параметров и энергетического спектра частиц при помощи анализатора с сепарирующей сеткой. На втором этапе в анализатор вместо сепарирующей сетки была установлена щелевая пластина, и производилась калибровка щелевого анализатора источником с уже известным спектром.

Эксперименты с ионным источником

В качестве рабочего газа использовался водород, который подавался внутрь источника через игольчатый натекатель. Перед основным экспериментом необходимо было определить рабочую точку ионного источника при различном давлении рабочего газа, поскольку должен существовать оптимум сигнала вследствие рассеяния ионов на фоновом газе. Минимально достигаемое давление без напуска составляет $2 \cdot 10^{-4}$ Па, напуск рабочего газа увеличивал давление внутри лампы вплоть до единиц паскалей. Было решено не превышать условный порог в 3 Па, поскольку дальнейшее повышение давления отрицательно сказывается на времени жизни катода ПМИ-27 и может привести к выходу ионного источника из строя.

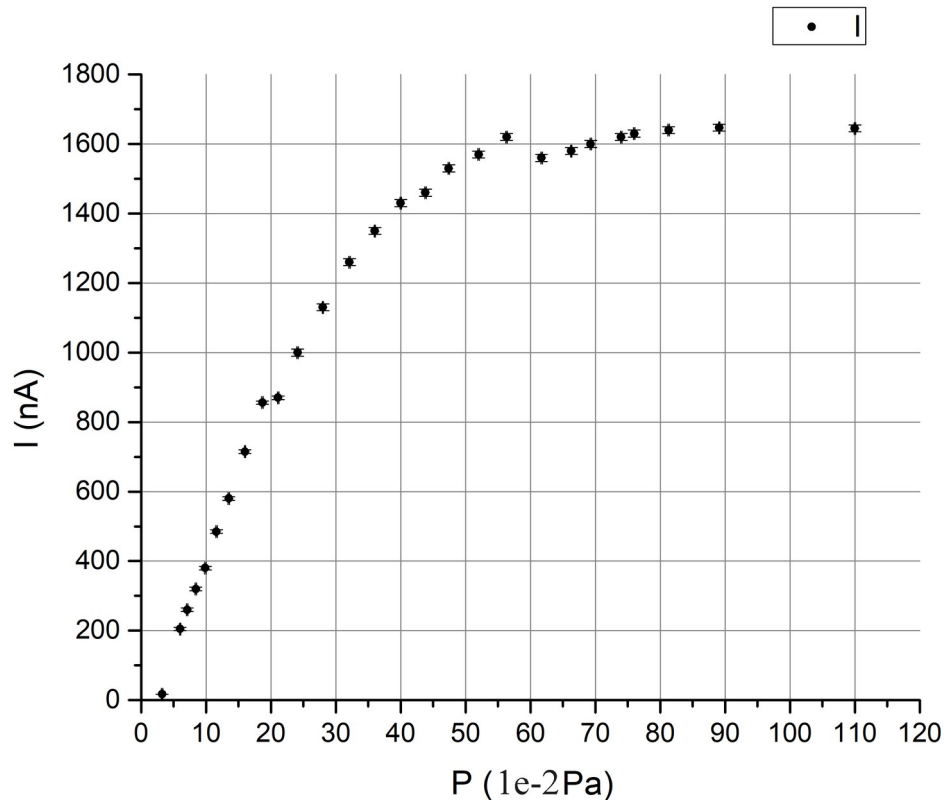


Рисунок 10. Зависимость ионного тока от давления.

На рис.10 представлена зависимость ионного тока от давления рабочего газа. Следует отметить, что ток эмиссии при постоянном токе накала увеличивался вместе с ростом давления, и чтобы предотвратить выход катода из строя, ток накала уменьшался при токе эмиссии более 6 мА. Разрывы в величине ионного тока возникали из-за отсутствия точной регулировки тока накала. Заметно, что при приближении к давлению на уровне нескольких паскалей внутри лампы генерация ионов приближается к насыщению.

При получении данной зависимости из анализатора были демонтированы сетки 2 и 3 (см. рис.7). Это было сделано для максимизации регистрируемого на коллекторе ионного тока, попадающего в апертуру анализатора. Прозрачность сеток 1 и 4 вместе составляет примерно 40%, поэтому регистрируемый ток в 2,5 раз меньше тока, попадающего во входную апертуру. Рабочей точкой источника было предложено считать

давление внутри лампы в диапазоне $1 \div 3$ Па, которое обеспечивало ионный ток порядка 4-5 мкА и позволяло оставаться в паспортном диапазоне ПМИ-27.

Следующим этапом была проверка параметров ионно-оптической системы, которые были определены на основании компьютерного моделирования. Результаты моделирования показали, что при ускоряющем напряжении U_0 линза должна иметь напряжение $0.65U_0$. Было проведено несколько экспериментов при различных давлениях и энергии частиц для определения оптимума напряжения на ионной линзе. На рис.11 изображена зависимость ионного тока при постоянном давлении и токе эмиссии от отношения между напряжениями, на которой виден максимум вблизи отношения $0.63U_0$. Это отношение было использовано во всех последующих экспериментах в качестве рабочего.

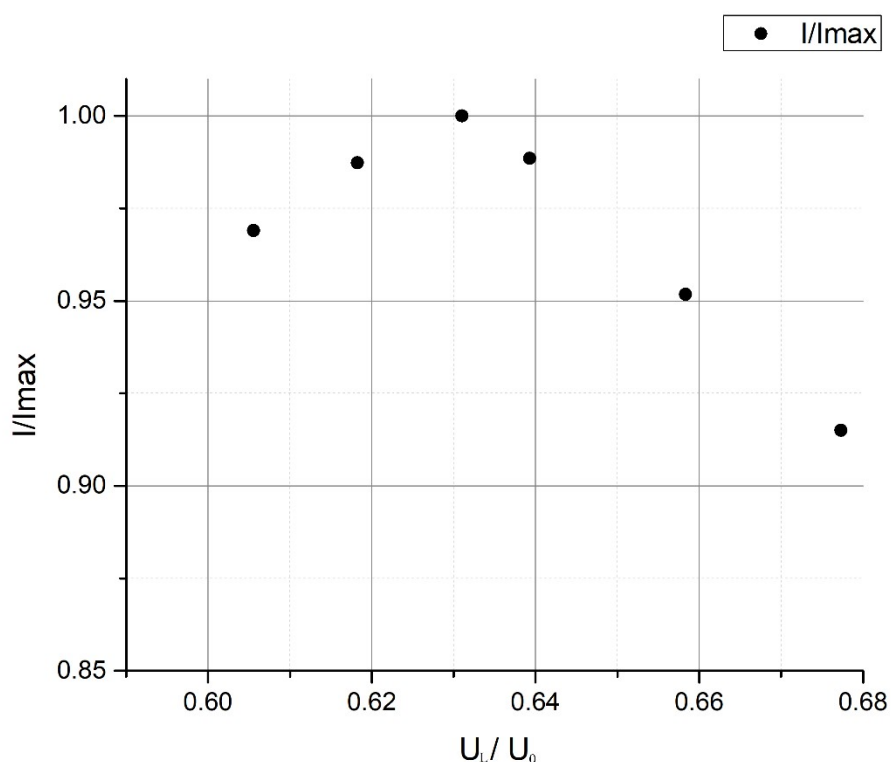


Рисунок 11. Зависимость плотности ионного тока от напряжения на линзе. Ускоряющее напряжение 1000 В.

Стоит отметить, что угловая расходимость частиц пучка прямо не измерялась. Строго говоря, рабочая точка источника по напряжению на линзе лишь обеспечивает максимальную плотность тока на анализатор, но не дает информации о расходимости. Впрочем, малый угловой разброс частиц не требовался для целей калибровки. Необходимо было получить достаточный для регистрации анализатором ионный ток, и данная конфигурация ионного источника удовлетворяла этому требованию.

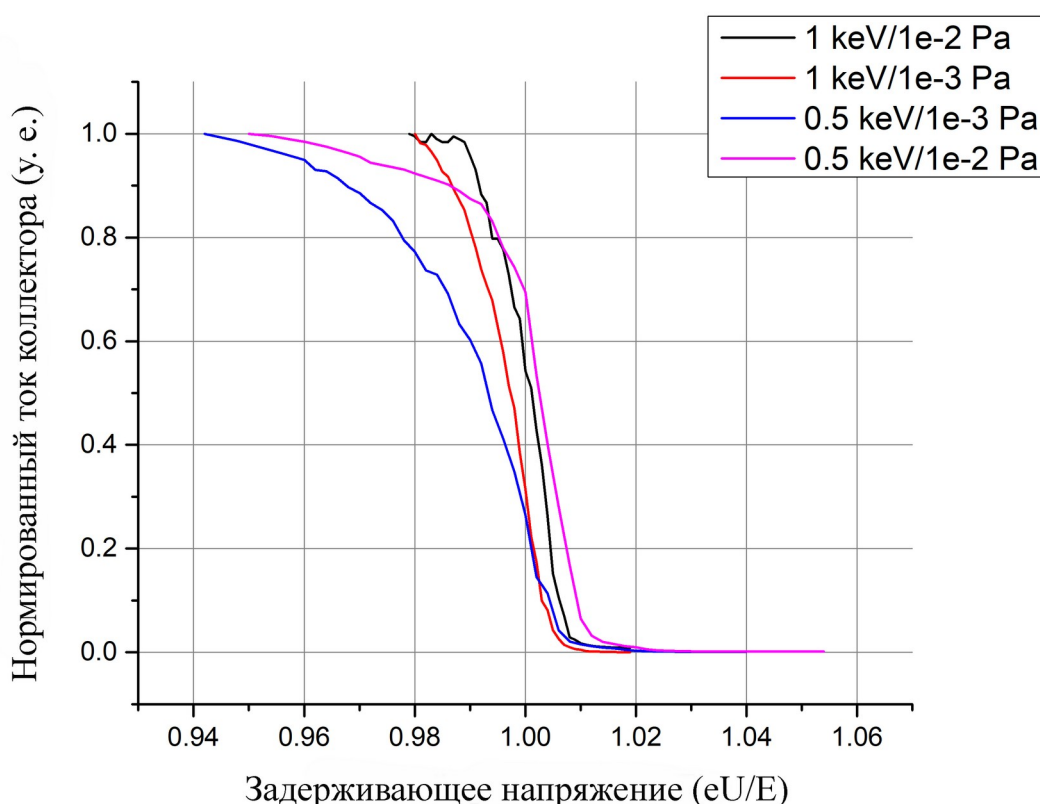
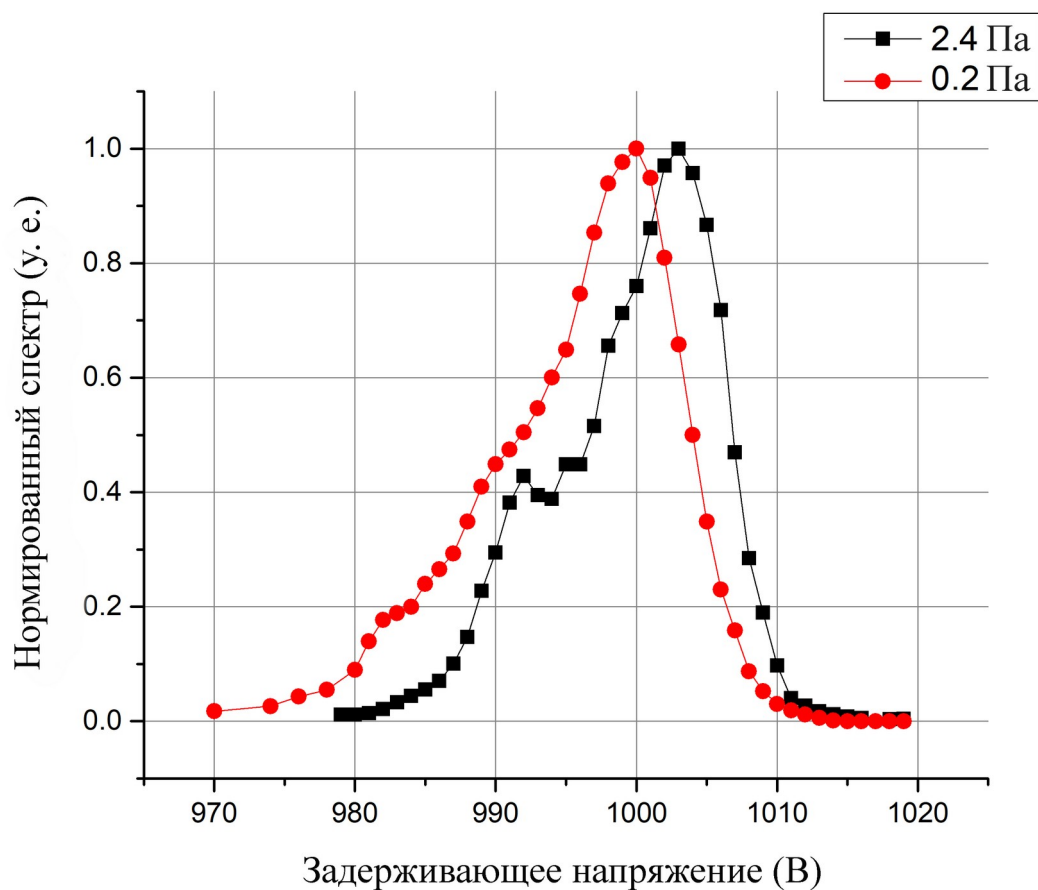


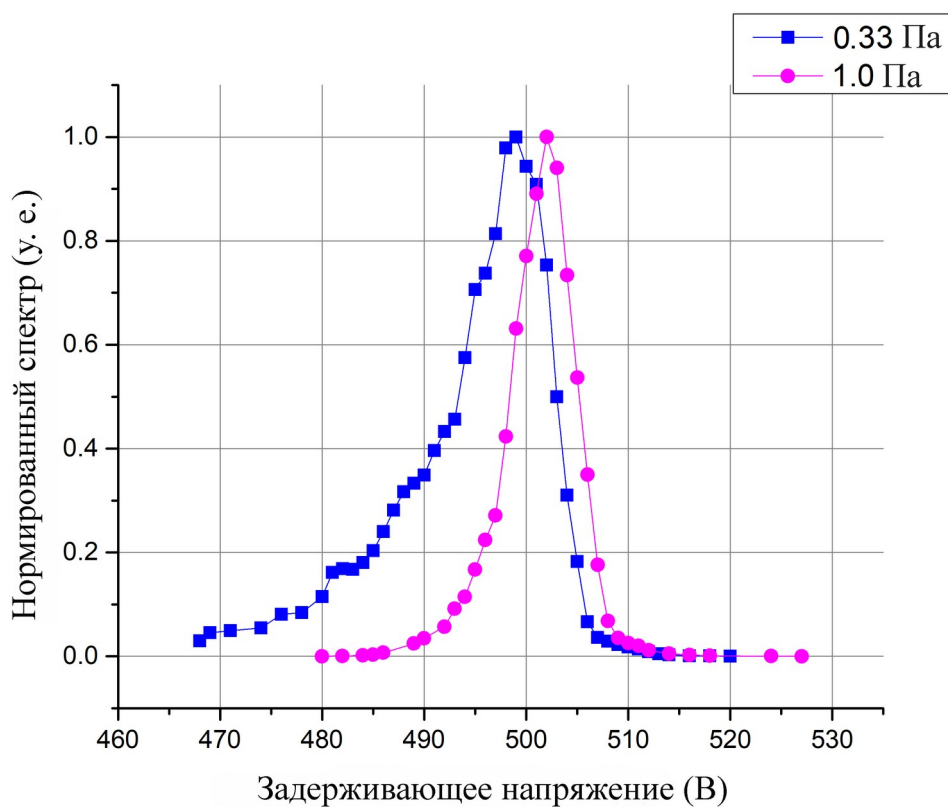
Рисунок 12. Исходный сигнал с сеточного анализатора при различных энергиях пучка и различном давлении рабочего газа.

После определения рабочих параметров калибровочного источника было решено перейти к измерениям энергетического состава ионов, в частности определению ширины спектра. Для этих целей использовался электростатический анализатор с установленной сепарирующей сеткой, на которую подавалось задерживающее напряжение. Были проведены эксперименты при двух разных энергиях пучка 0.5 и 1 кэВ, и разных

давлениях. На рис.12 представлены интегральные энергетические спектры для этих параметров эксперимента, нормированные по величине сигнала и задерживающему напряжению. Каждая из кривых была сглажена, а затем продифференцирована по напряжению для получения энергетического спектра ионов. Полученные спектры приведены на рис.13 и рис.14.



*Рисунок 13. Спектры ионов, полученные сеточным анализатором.
Ускоряющее напряжение 1кВ.*



*Рисунок 14. Спектры ионов, полученные сеточным анализатором.
Ускоряющее напряжение 500В.*

Измерение ширины энергетических спектров на уровне $1/e$ (Таб.1, Таб.2) дает следующие результаты.

Таблица 1. Ширины спектров для $E = 1$ кэВ.

Давление, Па	Ширина, эВ	Ширина, %
2.4	16.7	1.67
0.2	16.3	1.63

Таблица 2. Ширины спектров для $E = 500$ эВ.

Давление, Па	Ширина, эВ	Ширина, %
1.0	8.3	1.66
0.33	13	2.6

Результаты показывают, что во всех экспериментах относительная ширина спектра частиц пучка не превышает 2.6%, что меньше оценочной ширины аппаратной функции щелевого анализатора 5%. Таким образом, ионный источник удовлетворяет требованиям для экспериментальной проверки работы энергоанализатора с щелевой пластиной.

Эксперименты с щелевой пластиной

После замены сепарирующей сетки на щелевую пластину было проведено несколько опытов по определению аппаратной функции щелевого анализатора. Эксперименты были проведены при тех же энергиях частиц и близких давлениях, что и для сепарирующей сетки. На рис.15-18 представлено сравнение нормированных спектров пучка ионов, полученных при одинаковых внешних параметрах, для сеточного и щелевого вариантов энергоанализатора.

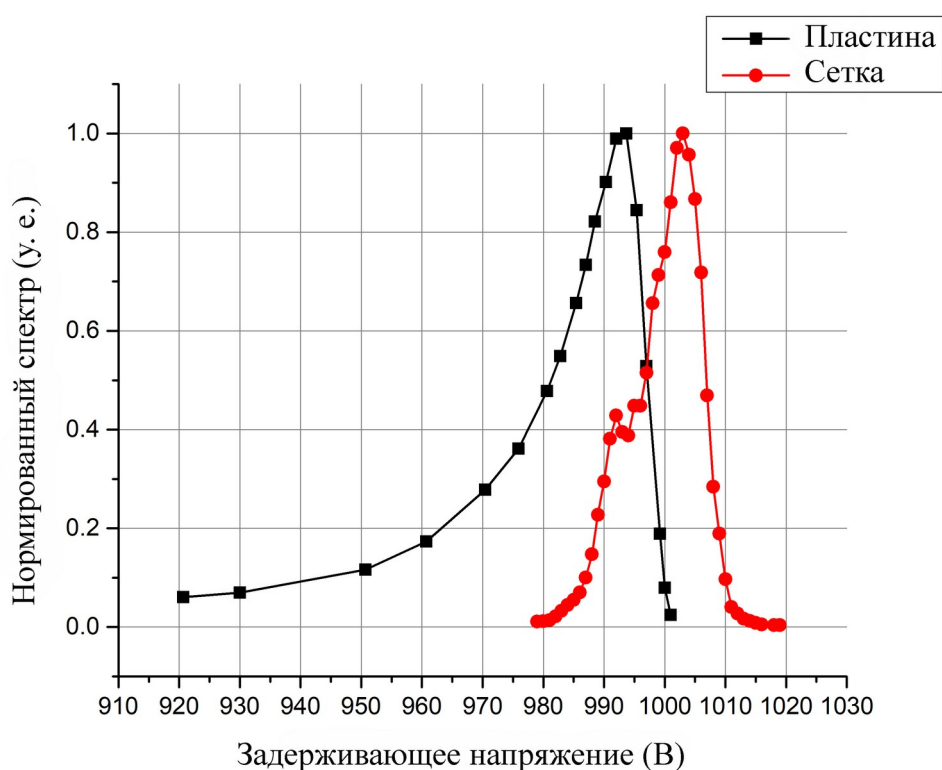


Рисунок 15. Сравнение пластины и сетки. $E = 1 \text{ кэВ}$, $P = 1 \text{ Па}$.

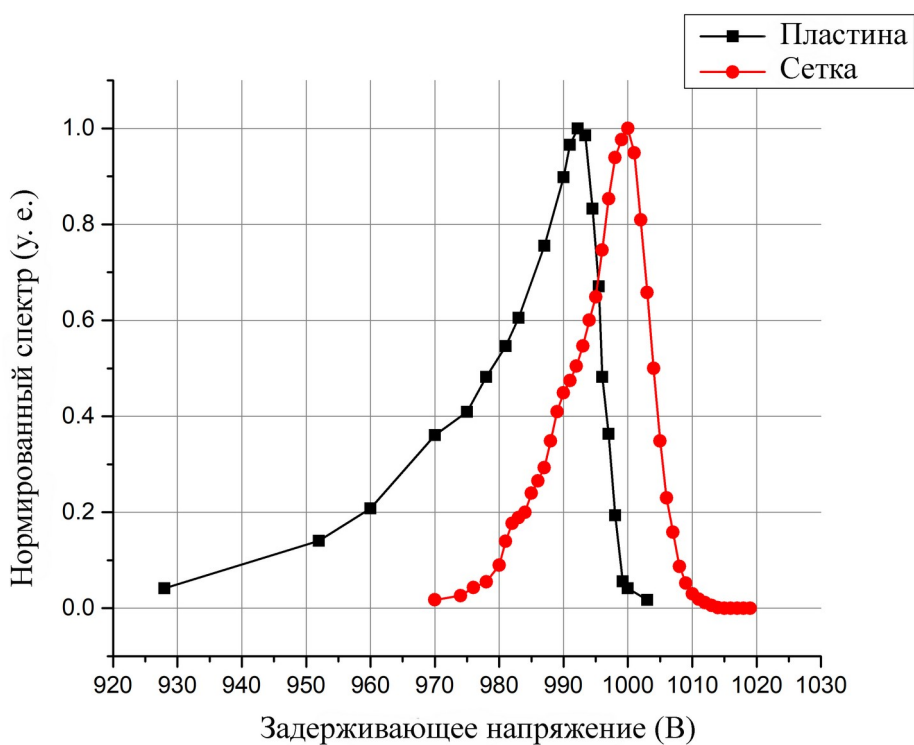


Рисунок 16. Сравнение пластины и сетки. $E = 1$ кэВ, $P = 0.1$ Па.

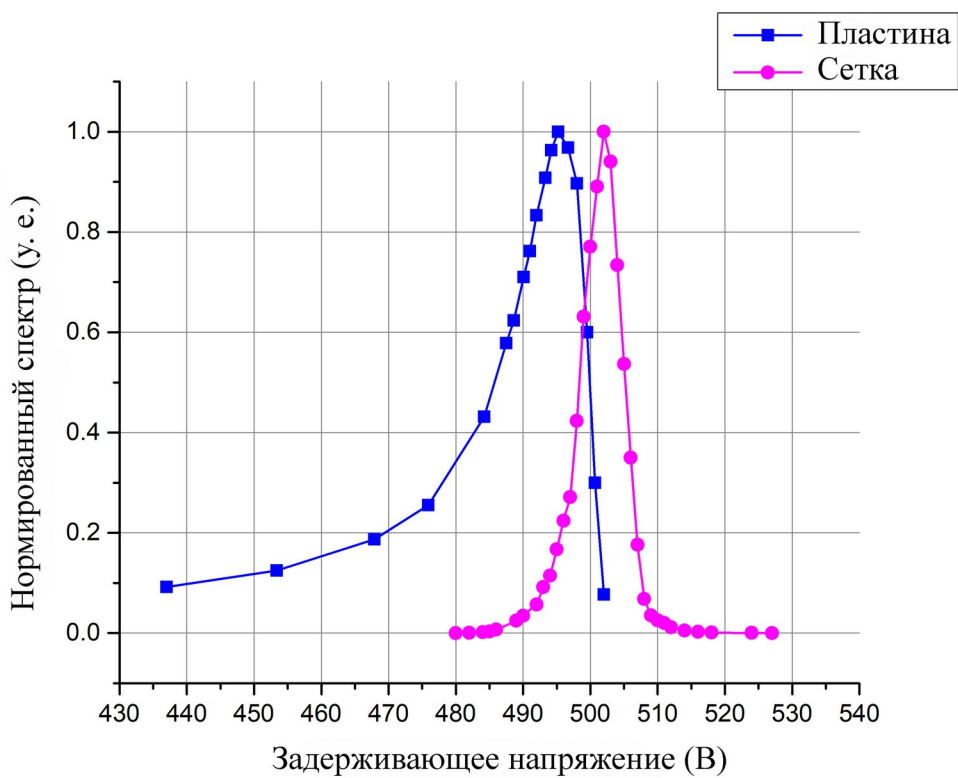


Рисунок 17. Сравнение пластины и сетки. $E = 500$ эВ, $P = 1$ Па.

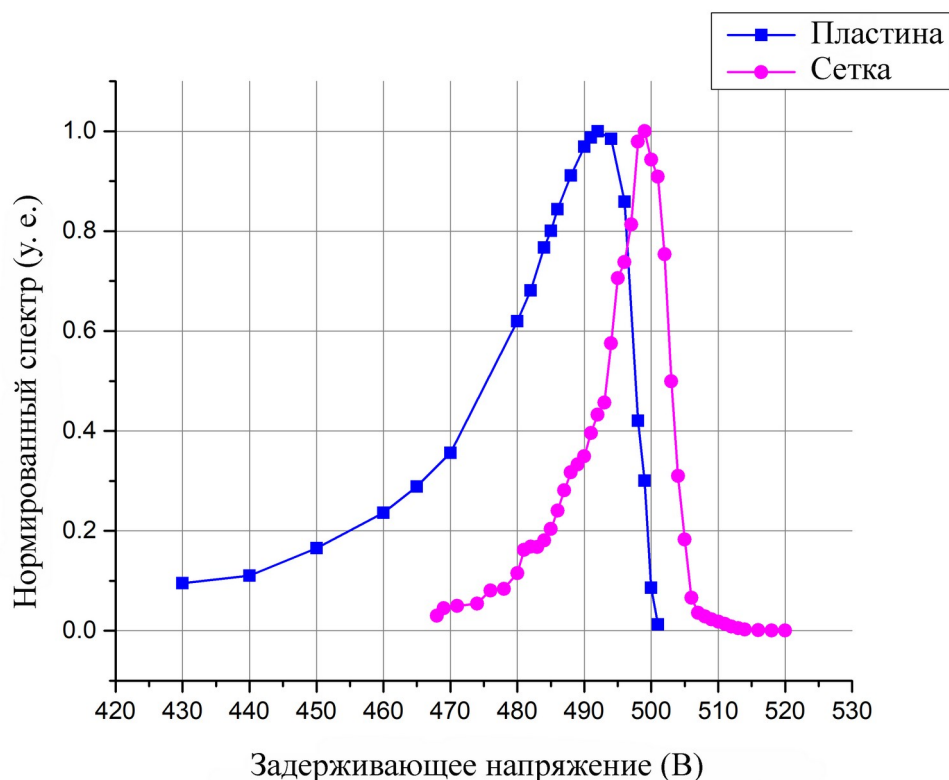


Рисунок 18. Сравнение пластины и сетки. $E = 500$ эВ, $P = 0.1$ Па.

Таб. 3. Ширина аппаратной функции щелевого анализатора при различных параметрах эксперимента.

Параметры эксперимента	Ширина, эВ	Ширина, %
$E = 1$ кэВ, $P = 1$ Па	23	2.3
$E = 1$ кэВ, $P = 0.1$ Па	28	2.8
$E = 500$ эВ, $P = 1$ Па	21.4	4.28
$E = 500$ эВ, $P = 0.1$ Па	29.6	5.92

В таб.3 для удобства сравнения приведены измеренные значения ширины аппаратной функции щелевого анализатора. Прежде всего полученные результаты подтвердили работоспособность нового энергоанализатора. Измеренные значения ширины аппаратной функции находится в диапазоне 20-30 эВ при различных параметрах пучка. Можно

заметить, что энергетическая ширина увеличивается (см. рис.15-16 и рис.17-18) при уменьшении давления в камере, причины такого поведения пока не объяснены.

Наиболее интересно, что для частиц с разными энергиями, при одном и том же давлении (см. рис.15, 17 и рис.16, 18) абсолютная ширина остается практически постоянной, что говорит о независимости аппаратной функции от энергии частиц в исследованном диапазоне энергий. Это означает, что щелевой анализатор хорошо пригоден для измерения функции распределения высокоэнергетических частиц, где относительная ширина аппаратной функции достаточно мала. Например, при регистрации ионов с энергией 200 эВ относительная ширина уже будет составлять порядка 10-12%, при условии, что ширина продолжит не зависеть от энергии частиц. Это обстоятельство несколько ограничивает применение щелевого анализатора для ионов с энергией менее 100 эВ.

Ясно, что ширина аппаратной функции щелевого анализатора зависит от геометрии канала. Это проявляется в том, что пластина может частично пропускать ионы, которые должны были погибнуть на её стенках. Резерфордовское рассеяние на большие углы таких ионов на стенке канала приводит к тому, что часть ионов рассеивается в телесный угол, совпадающий с направлением на выход из канала. Этот телесный угол возможно уменьшить, увеличив длину канала. Однако проверка этих утверждений требует проведения дополнительных экспериментов.

Заключение

- В ходе работ был спроектирован и собран ионный источник с высокой монохроматичностью ионов по энергии с $\frac{\Delta E}{E} < 3\%$ и малым угловым разбросом и высокой яркостью (ток до 10 мкА).
- Была экспериментально подтверждена концепция работы щелевого анализатора, позволяющая восстанавливать функцию распределения ионов по энергии напрямую, без процедуры дифференцирования регистрируемого сигнала.
- Была определена аппаратная функция электростатического анализатора с щелевой пластиной. Выяснено, что ширина аппаратной функции не зависит от энергии регистрируемых частиц в широком диапазоне. Этот факт ограничивает область применения электростатического анализатора с щелевой пластиной. Анализатор пригоден для измерения частиц с энергиями выше 100-150 эВ. Показано, что ширина аппаратной функции не превышает 25 эВ в интересующем диапазоне энергий регистрируемых частиц.

Список литературы

1. К. С. Колесниченко, Р. В. Воскобойников, Р. С. Иванов и др. // Оптимизация параметров мишенной плазмы в эксперименте на установке КОТ // XLIX Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу (ICPAF-2022), Москва, 14-18 марта 2022 г. // сборник тезисов докладов. - М.: ПЛАЗМАИОФАН, 2022, с. 85. DOI [10.34854/ICPAF.2022.49.1.052](https://doi.org/10.34854/ICPAF.2022.49.1.052).
2. Rostoker, N.; Binderbauer, M.; Monkhorst, H.J. // Fusion reactors based on colliding beams in a field reversed configuration plasma. // Annual meeting of the American Nuclear Society. Fusion Technology. 16–20 June 1996. Vol. 30, no. 3. Reno, NV: American Nuclear Society. pp. 1395–1402. ISSN 0748-1896
3. Г. И. Будкер // Термоядерные реакции в системе с магнитными пробками. К вопросу о непосредственном преобразовании ядерной энергии в электрическую // Физика плазмы и проблема управляемых термоядерных реакций, т.3, М. : Издательство АН СССР. С.3-31, 1958.
4. Post R.F. // The magnetic mirror approach to fusion // Nuclear Fusion. – Vol. 27, No 10. – P.1577-1752. 1987.
5. Akhmetov T., Bekher S., Davydenko V., Krivenko A., Muraviev M., R. Vladimir, S. Vladimir less. // Increase of Hot Initial plasma Energy content in the End system of AMBAL-M During Hydrogen puffing // November 1997, Plasma Physics Reports, 23(11):911
6. С. В. Мурахтин, О. А. Коробейникова // Модернизированный сеточный энергоанализатор для изучения потоков частиц на установке ГДЛ. // XLVI Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС 18-22 марта 2019, с. 79.

7. Ахметов Т. Д., Белкин В. С., Бендер Е. Д., Давыденко В. И., Димов Г. И. и др. // Создание горячей стартовой плазмы в концевой системе АМБАЛ-М // Физика плазмы. — 23. 1996. — С. 988-1001.
8. P. A. Bagryansky, T. D. Akhmetov, I. S. Chernoshtanov, P. P. Deichuli, A. A. Ivanov, A. A. Lizunov, V. V. Maximov, V. V. Mishagin, S. V. Murakhtin, E. I. Pinzhenin, V. V. Pikhodko, A. V. Sorokin, and V. V. Oreshonok // "Status of the experiment on magnetic field reversal at BINP". // AIP Conference Proceedings 1771, 030015 (2016) <https://doi.org/10.1063/1.4964171>
9. Scrivens R. // Classification of Ion Sources. // CAS-CERN Accelerator School: Ion Sources - Proceedings. 10.5170/CERN-2013-007.9 (2014).
10. Robert T. Bayard and Daniel Alpert // "Extension of the Low Pressure Range of the Ionization Gauge" // Review of Scientific Instruments 21, 571-572 (1950) <https://doi.org/10.1063/1.1745653>
11. Е. А. Шишкин // Изучение формирования и транспортировки слаботоочного стационарного пучка для калибровки систем диагностики плазмы // Материалы 59-й Международной научной студенческой конференции : МНСК-2021, Новосибирск, 12–23 апреля 2021 г. - Новосибирск : НГУ, 2021. - С. 64
12. Преобразователь манометрический ионизационный ПМИ-27. Техническое описание и инструкция по эксплуатации ЮР 2. 832. 000. ТО