

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

Силотиной Викторией Артуровны

(Фамилия, Имя, Отчество автора)

Тема работы Изучение состава примесей в плазме установки ГОЛ-NB

«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

Содержание

Введение.....	3
Глава 1. Примеси в водородной плазме.....	5
1.1 Источники и роль примесей в плазме.....	5
1.2 Оценка частот столкновения и типа равновесия плазмы в установке для разных параметров.....	6
1.3 Источники данных об энергетических уровнях и переходах.....	8
Глава 2. Установка ГОЛ-NB.....	10
Глава 3. Исследование спектра излучения плазмы.....	13
3.1 Устройство и принцип работы оптического спектрометра.....	13
3.2 Спектр излучения плазмы до установки кольцевых электродов.....	14
3.3 Оценка параметров плазмы по линии C^{2+}	16
3.4 Спектр излучения плазмы после установки кольцевых электродов.....	18
3.5 Динамика спектра в зависимости от времени относительно разряда.....	21
Глава 4. Исследование состава нейтрального газа.....	23
4.1 Устройство и принцип действия масс-спектрометра.....	23
4.2 Масс-спектр до и после выстрела.....	23
4.3-Динамика концентрации примесей после выстрела.....	25
Заключение.....	27
Список литературы.....	28

Введение

Большинство видов ископаемого топлива, которое сейчас используется в качестве источника энергии, ограничено в количестве, и его использование способствует выбросу парниковых газов и загрязнению планеты, а использование ядерных реакторов грозит радиационным загрязнением и опасностью аварий. При этом спрос на энергию, особенно с нынешними темпами развития науки и техники, постоянно растет. Для удовлетворения нужд человечества нужен новый стабильный, экономически и экологически выгодный, а главное относительно безопасный источник энергии. На эту роль предлагается множество кандидатов, в том числе управляемый термоядерный синтез.

Для реализации реактора, принцип работы которого заключается в использовании энергии термоядерного синтеза, предлагаются разные системы для удержания высокотемпературной плазмы. Большая часть идей для реактора зародилась еще в 50х годах. Одной из таких идей является «пробкотрон Будкера-Поста». Эта идея нуждалась в усовершенствовании из-за неустойчивостей, продольных потерь и других недостатков, и в качестве одного из вариантов решения проблемы были предложены многопробочные ловушки, представляющие собой несколько последовательно соединенных элементарных пробкотронов. В ИЯФ СО РАН ведутся исследования, связанные с удержанием плазмы в открытых ловушках. Одна из таких систем - ГОЛ-NB (гофрированная открытая ловушка) создана для проверки идеи многопробочного удержания.

Для обеспечения необходимых параметров и получения информации о плазме нужно проводить диагностику разными методами, в том числе диагностику примесей. Помимо напускаемого в камеру рабочего газа в установке могут быть источники других веществ, которые в будущем могут повлиять на состав плазмы, а также на ее параметры. Для исследования плазмы на установке ГОЛ-NB в настоящее время применяются несколько

диагностик первой очереди, в число которых входят оптический спектрометр для измерения спектра излучения плазмы и масс-спектрометр для анализа остаточного газа по измеренному масс-спектру. Задачей данной работы является измерение и анализ оптического спектра в видимом диапазоне и масс-спектра. По полученным данным можно определить состав примесей в плазме, оценить некоторые параметры плазмы и тип равновесия.

Глава 1. Примеси в водородной плазме

1.1 Источники и роль примесей в плазме

Источниками примесей в плазме установки ГОЛ-НВ служат остаточный газ (воздух) и элементы конструкции установки. Основными ионами примесей, которые мы можем наблюдать, являются ионы азота и кислорода, источником которых является воздух, углерод, источниками которого выступают витон, углеводородные пленки и пластиковые элементы конструкции, железо, хром, никель, титан и молибден, источниками которых могут быть элементы конструкции установки. Все указанные химические элементы имеют яркие спектральные линии в видимом диапазоне.

Ионы примесей оказывают сильное влияние на параметры плазмы: меняются частоты столкновений, увеличиваются потери энергии на ионизацию и возбуждение этих примесей, увеличиваются потери на излучение. Частота столкновений между двумя заряженными частицами рассчитывается по формуле [1]:

$$f_{ii} = n \cdot v \cdot \sigma_{ii}$$

$$\sigma_{ii} \approx \frac{0,07 \cdot 10^{12} \cdot \Lambda \cdot Z_1^2 \cdot Z_2^2}{T_i^2},$$

где σ_{ii} – сечение столкновения, Λ – кулоновский логарифм, T_i – температура ионов, Z_1, Z_2 – зарядовые числа частиц. По этой формуле можно определить, как меняется частота столкновений при изменении эффективного заряда при наличии различных примесей.

Основными типами излучения плазмы являются тормозное, рекомбинационное и излучение в линейчатом спектре возбужденными атомами и ионами, при наличии магнитного поля существует еще и синхротронное излучение. Тормозное излучение возникает при рассеянии заряженных частиц друг на друге. Под рассеянием подразумевается процесс столкновение частиц, при котором число и состав взаимодействующих частиц

не меняются. Рекомбинационное излучение появляется, когда происходит процесс рекомбинации, при котором в результате столкновения электрона с ионом степень ионизации иона понижается. Излучение в линейчатом спектре возникает при переходе электрона с более высокого на более низкий энергетический уровень.

По спектру линейчатого излучения можно определить какие вещества присутствуют в плазме и их концентрации. Интенсивность спектральной линии рассчитывается по формуле:

$$I_{kn} = h\nu_{kn} A_{kn} N_k$$

$$A_{kn} = \frac{2e^2}{m_e c^3} \nu_{kn}^2 \frac{g_n}{g_k} f_{nk},$$

где f_{nk} - сила осциллятора, $g_{n,k}$ - стат. веса состояний, A_{kn} - вероятность спонтанного перехода, N_k - плотность возбужденных атомов, ν_{kn} - частота перехода, m_e - масса электрона, c - скорость света, e - заряд электрона.

1.2 Оценка частот столкновения и типа равновесия плазмы в установке для разных параметров

Полное термодинамическое равновесие в плазме выполняется при условии соблюдения принципа детального равновесия. При этом конкурирующие процессы проходят с одинаковой скоростью. Например, фоторекомбинация и фотоионизация, излучение и поглощение спектральных линий, возбуждение и тушение, ионизация электронным ударом и трехчастичная рекомбинация [2]. В плазме реальных установок часто встречаются отклонения от полного равновесия. Для описания реальной плазмы существуют приближенные модели такие как локальное термодинамическое равновесие (ЛТР) и корональное равновесие.

Локальное термодинамическое равновесие может выполняться при условии, что радиационные процессы не влияют на заселенность уровней, а столкновения достаточно частые:

$$f \gg A_{sk}$$

Где f - частота столкновений, приводящих к возбуждению иона, а A_{sk} - вероятность спонтанного перехода с s -го на k -ый уровень. При ЛТР все функции распределения бoльцмановские.

Корональное равновесие выполняется в плазме с редкими столкновениями. Баланс ионов, электронов и атомов поддерживается процессами ионизации электронным ударом и рекомбинации с излучением фотонов.

Чтобы оценить тип равновесия для разных параметров плазмы, а именно для разных температур и плотностей, был проведен расчет частот столкновений электронов с ионами по формулам:

$$f_{ei} = n \cdot v \cdot \sigma$$

Где n - концентрация электронов, v -скорость электронов, а σ - сечение столкновения электрона с ионом рассчитывается по формуле:

$$\sigma = 4 \cdot \pi \cdot \Lambda \cdot e^4 / T^2$$

Скорость электронов оценивается как тепловая по формуле:

$$v = \sqrt{T/m}$$

В формуле сечения столкновения присутствует кулоновский логарифм Λ , оцениваемый по формуле:

$$\Lambda = \ln(\lambda_D / b_*)$$

Где λ_D - дебаевский радиус, а b_* - кулоновский радиус:

$$\lambda_D = 7,43 \cdot 10^2 * \sqrt{T/n}$$

$$b_* = e^2 / T$$

Где e - заряд электрона, а T - температура плазмы.

На рисунке 1 показаны графики зависимости классической частоты столкновений от температуры для нескольких типичных значений плотности электронов и $Z = 1$.

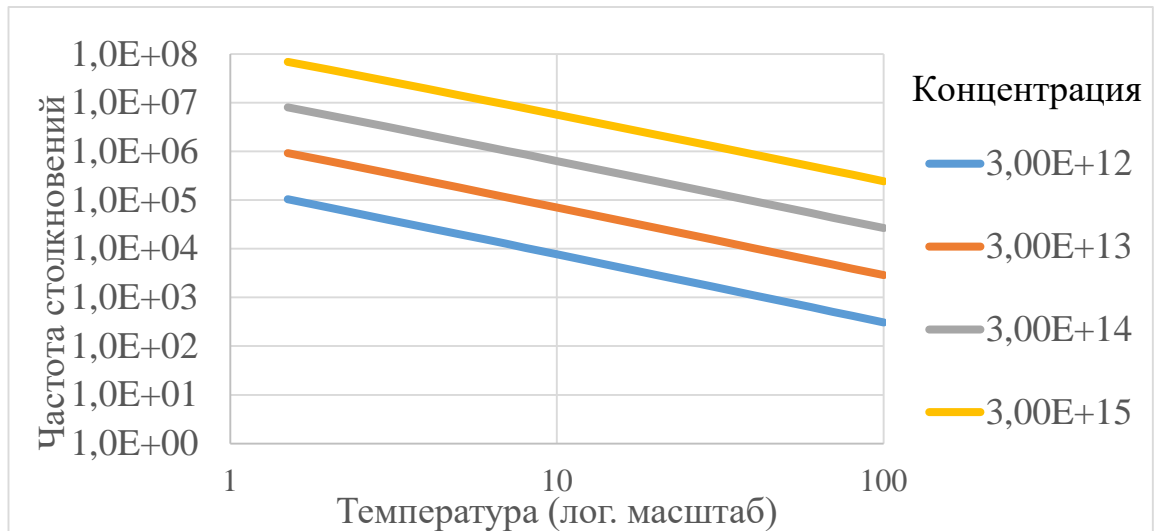


Рис. 1. Зависимость частоты столкновений (с^{-1}) от температуры (эВ) для различных концентраций электронов (см^{-3})

Для обнаруженной в спектре излучения яркой линии C^{2+} , $A_{sk}=7,25 \cdot 10^7 \text{с}^{-1}$. А для заданных параметров плазмы (средняя плотность плазмы равна $3 \cdot 10^{19} \text{см}^{-3}$ и температура плазмы около 6 эВ) частота столкновений равна 10^6с^{-1} . Это говорит о том, что поскольку частота столкновений меньше, чем вероятность спонтанного перехода, тип равновесия для таких ионов, находящихся на соответствующем верхнем излучательном уровне, ближе к корональному.

Для линии H_α $A_{sk}=4,41 \cdot 10^7 \text{с}^{-1}$, а для линии H_β $A_{sk}=8,4 \cdot 10^6 \text{с}^{-1}$. Следовательно, для этих линий тоже выполняется корональное равновесие.

Для линии C^+ на длине волны 486,7 $A_{sk}=2,44 \cdot 10^6 \text{с}^{-1}$, что говорит о том, что реализуется промежуточный тип равновесия между корональным и ЛТР.

1.3 Источники данных об энергетических уровнях и переходах

Для поиска данных о спектральных линиях использовались базы данных NIST [3] и Гротриан [4]. В них содержится информация о спектральных

линиях и соответствующих им переходах, энергиях и вероятностях спонтанного перехода для разных ионов химических элементов. В базе данных NIST можно найти данные о спектральных линиях при разных параметрах плазмы, например, температуре и плотности электронов, при условии выполнения ЛТР. Также можно найти относительную концентрацию ионов при разных температурах при ЛТР. Для примера на рисунке 2 представлен спектр углерода при температуре 5 эВ и показана относительная концентрация ионов.

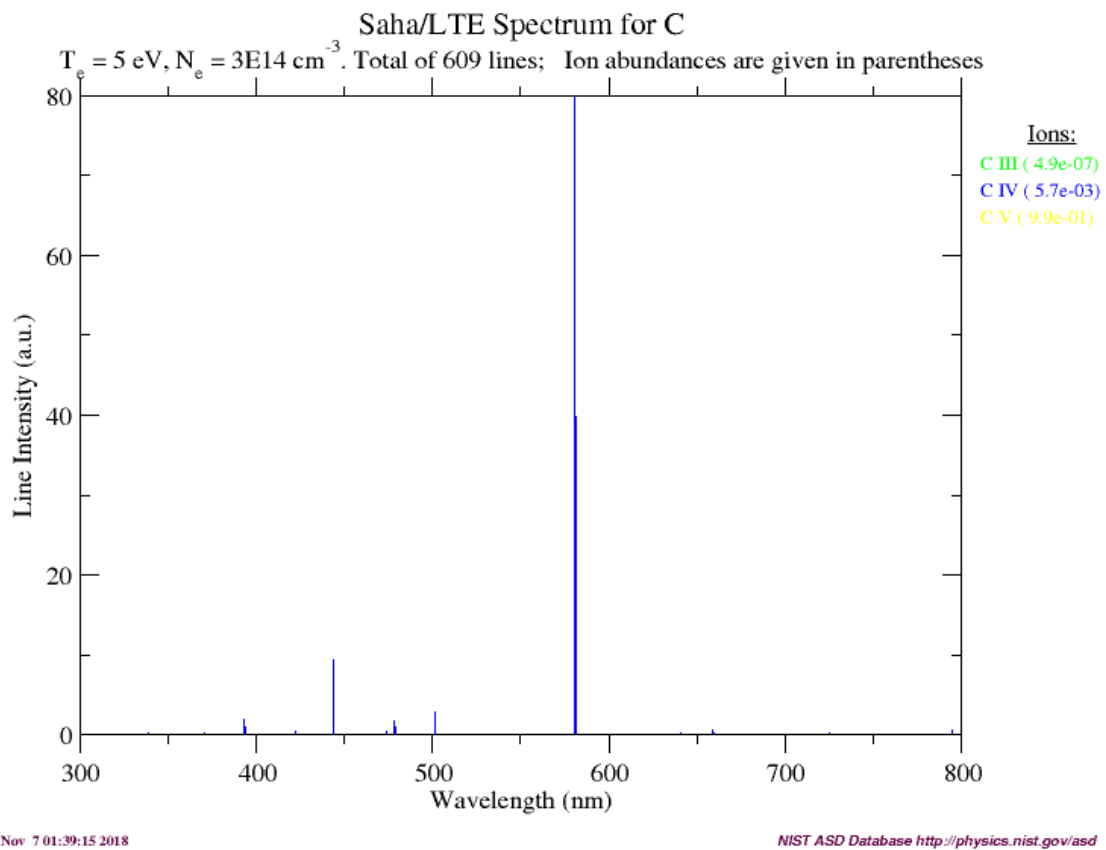


Рис. 2 Спектр ионов углерода при температуре 5 эВ и плотности электронов $3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$.

Глава 2. Установка ГОЛ-NB

В настоящее время в ИЯФ СО РАН строится многопробочная ловушка ГОЛ-NB, которая будет состоять из центральной газодинамической ловушки, двух пристыкованных к ней многопробочных соленоидов и концевых расширителей магнитного потока [5], [6]. Нагрев плазмы в установке будет производиться методом атомарной инъекции. В настоящее время эксперименты проводятся на стартовой конфигурации ГОЛ-NB.

Стартовая конфигурация установки представляет собой открытую ловушку, состоящую из соленоида длиной 3,5 м, создающего магнитное поле (рис. 3), двух расширителей и инжекторов нейтральных атомов. Магнитная система состоит из 34 катушек сильного поля, 4 катушек, формирующих магнитное поле в области расширителей и двух катушек, создающих магнитное поле вблизи источника плазмы. Схема магнитного поля установки показана на рис. 3 в двух разных режимах – в режиме однородного магнитного поля и в режиме гофрированного магнитного поля. Индукция магнитного поля временно ограничена предельным полем в точках размещения турбомолекулярных насосов.

Низкотемпературная плазма создается при помощи коаксиального дугового источника. Внутри катода импульсно напускается рабочий газ (водород), на катод подается напряжение 1,8 кВ. Типичная зависимость тока источника плазмы от времени представлена на рис. 4. Далее плазменная струя сжимается в нарастающем магнитном поле и транспортируется через многопробочный соленоид.

В эксперименте использовалось несколько диагностик для измерения параметров плазмы. Инжектор атомарного пучка использовался в качестве диагностического и измерял динамику линейной плотности плазмы. Подвижный четырехэлектродный ленгмюровский зонд мог располагаться на различных расстояниях от источника плазмы, с его помощью измерялись радиальные распределения плотности, радиальное электрическое поле и

электронная температура. Параметры плазмы по данным ленгмюровских зондов: средняя плотность плазмы равна $3 \cdot 10^{19} \text{см}^{-3}$ и температура плазмы около 6 эВ. Помимо этого, использовались быстрые цифровые фото- и видеокамеры и широкополосные фотодиоды ФДУК-100УФ.

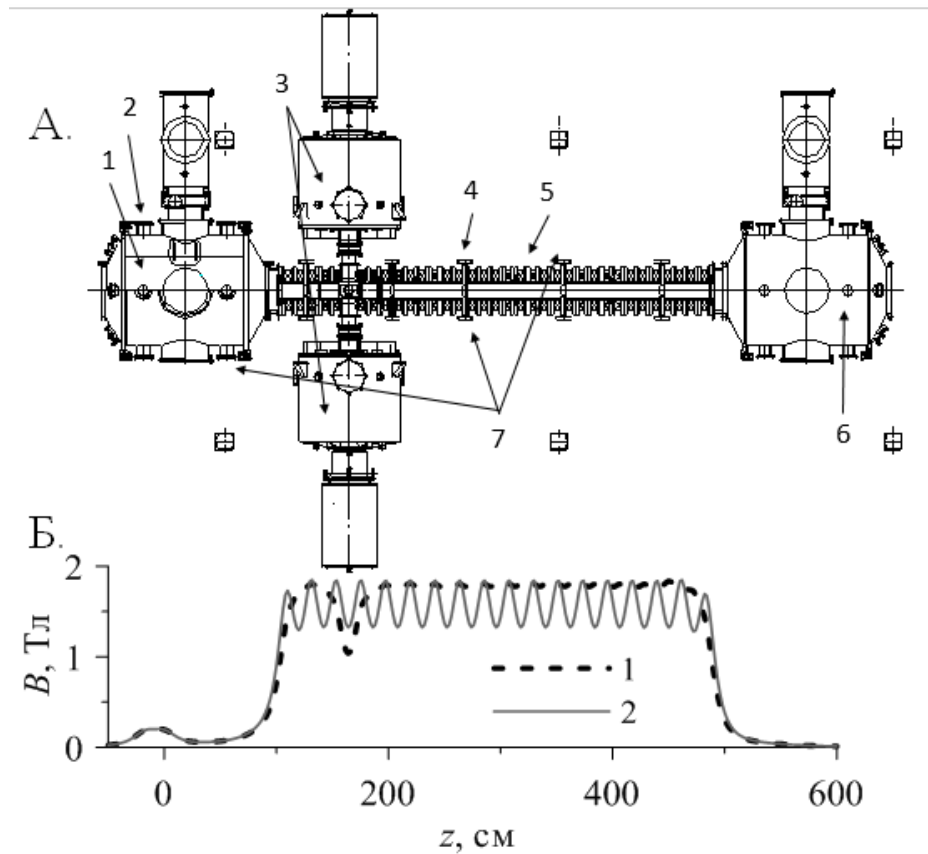


Рис. 3. А - Схема установки ГОЛ-NB. 1 - источник плазмы, 2 – положение масс-спектрометра MKS e-vision. 3 - инжекторы нейтральных атомов, 4 – фотодиод ФДУК-100УФ (монитор видимого и ВУФ излучения), 5 - многопробочный соленоид, 6 – плазмоприемник, 7 - положения световода спектрометра Thorlabs CCS100,

Б - Распределение индукции продольного магнитного поля на оси установки в двух разных конфигурациях: 1 – однородное поле, 2 – многопробочное поле

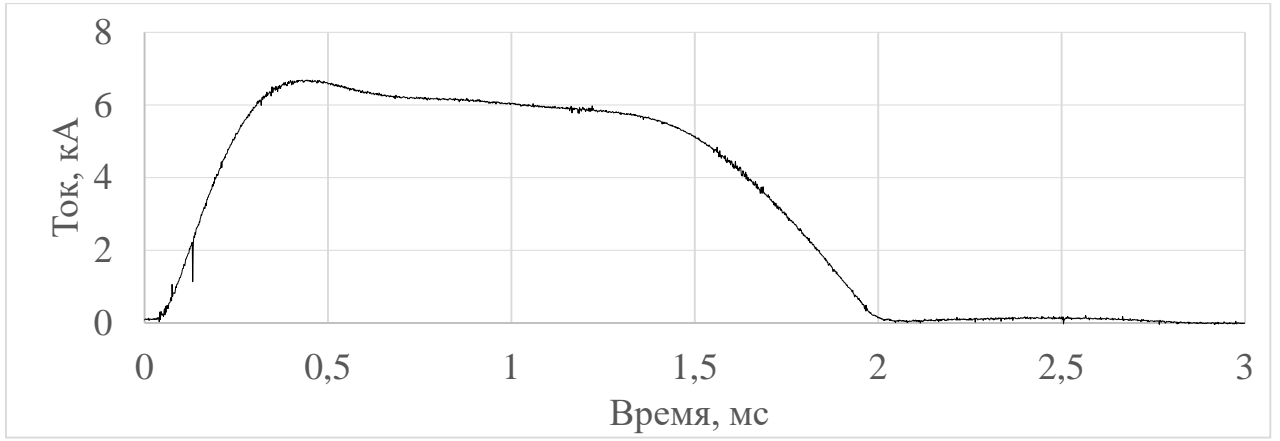


Рис. 4. Зависимость силы тока разряда в источнике плазмы от времени

Глава 3. Исследование спектра излучения плазмы

3.1 Устройство и принцип работы оптического спектрометра

Для измерения спектра излучения плазмы использовался оптический спектрометр Thorlabs CCS100. Устройство спектрометра соответствует схеме Черни-Тернера (рис.5). Отражающая способность решетки для разных поляризаций представлена на рис. 6 (по данным производителя [7]). Диапазон длин волн, в котором проводились измерения – от 350 нм до 700 нм. Разрешающая способность спектрометра – 10 пикселей/нм. Отношение сигнал : шум – 2000:1. Время измерения – 660 мкс-60 с. Плотность штрихов дифракционной решетки – 1200 мм^{-1} .

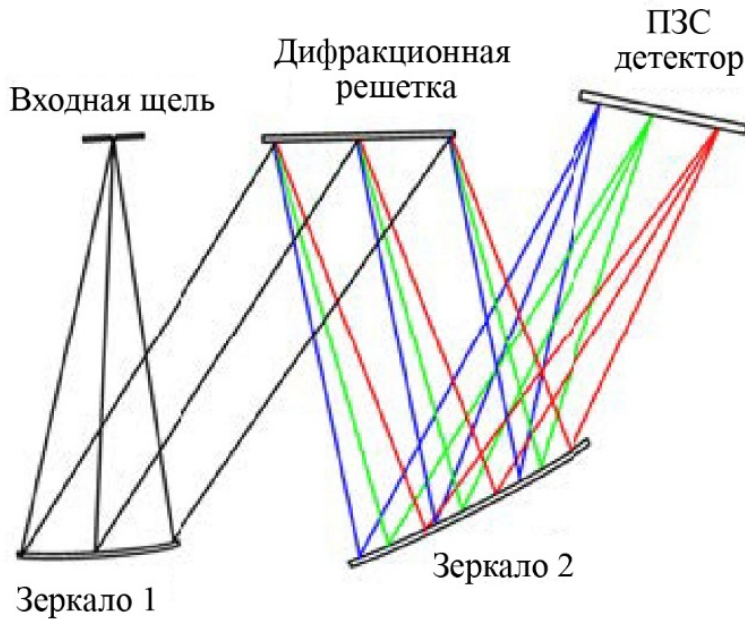


Рис. 5. Схема Черни-Тернера

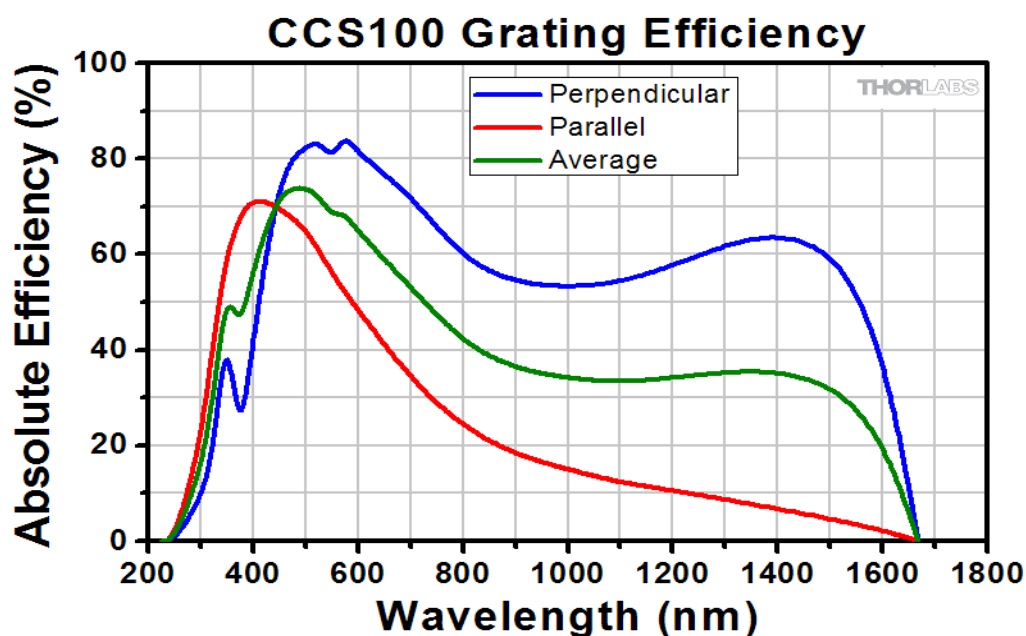


Рис. 6. Отражающая способность дифракционной решетки для разных поляризаций.

Излучение передается от установки на спектрометр по гибкому оптоволокну, которое располагалось в разных точках по длине установки. В оптоволокну свет фокусировался объективом с фокусным расстоянием 20 мм и светосилой равной 2.

3.2 Спектр излучения плазмы до установки кольцевых электродов

Спектральная диагностика на установке ГОЛ-НВ использовалась, начиная с первых экспериментов. При этом внутри вакуумной камеры не были смонтированы защитные лимитеры и не были установлены плазмоприемники. Оказалось, что в такой конфигурации установки плазма имела синий цвет, а в спектре преобладали линии примесей – см .рис. 7. Одна из самых ярких линий примесей - это линия дважды ионизованного углерода, соответствующая длине волны 465 нм. В спектре были видны менее яркие линии водорода (656,3 и 486,1 нм) и других примесей.

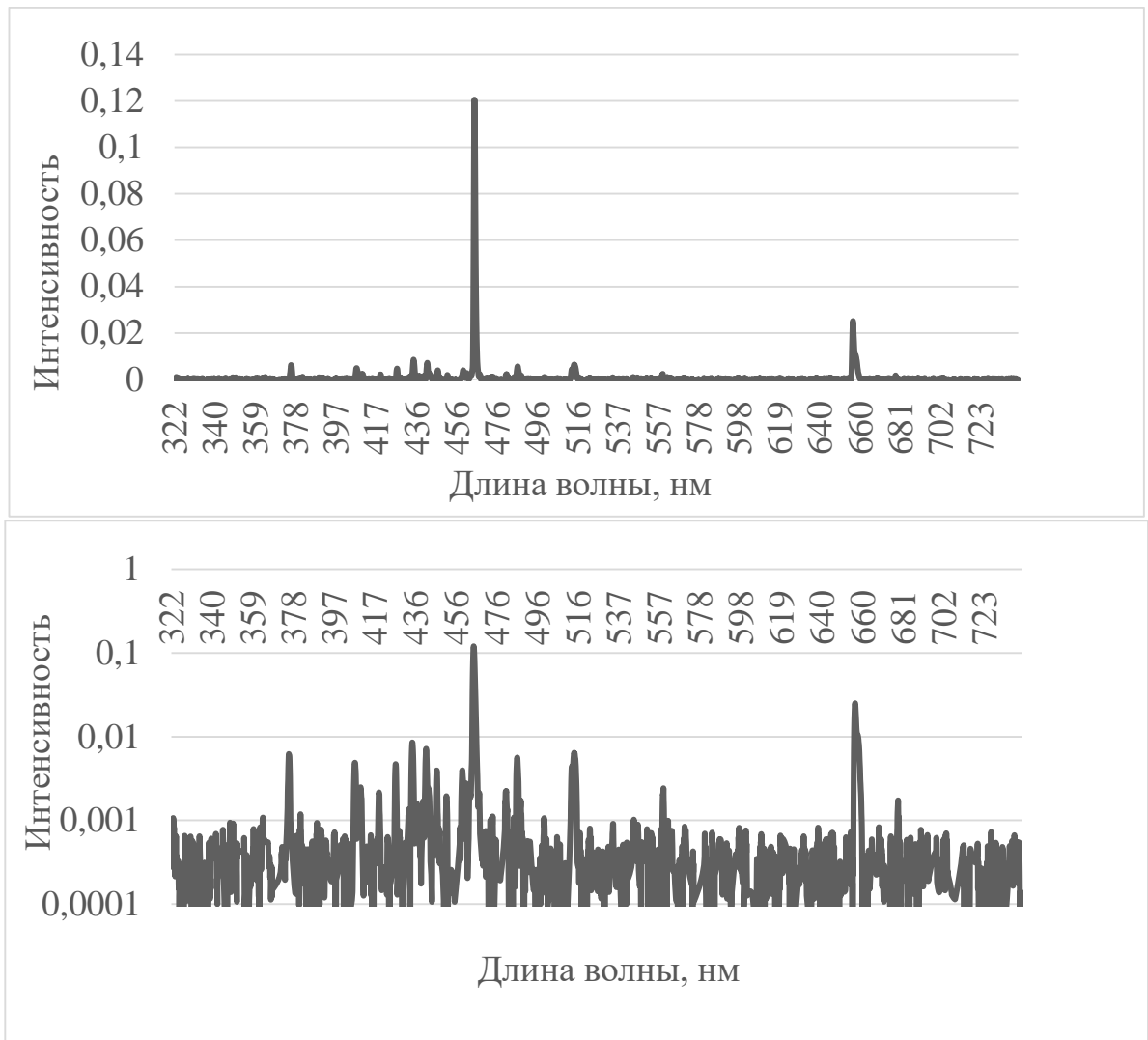


Рис.7. Спектр излучения плазмы до установки кольцевых электродов в линейном и логарифмическом масштабах

Основные спектральные линии были идентифицированы, однако данная ситуация была признана неудовлетворительной в целом. Поэтому по данным нескольких диагностик был проведен анализ формы и динамики развития разряда. Оказалось, что помимо основного плазменного шнура, распространяющегося от анода плазменной пушки, существовала достаточно плотная плазменная корона, которая занимала практически весь объем и попадала на стенки вакуумной камеры – см. фотографию плазмы на выходе из соленоида на рис. 8.

Предпринятые меры включали установку секционированного плазмоприемника вблизи источника плазмы и лимитера перед магнитной пробкой. Результаты экспериментов в новой конфигурации будут описаны в разделе 3.4.

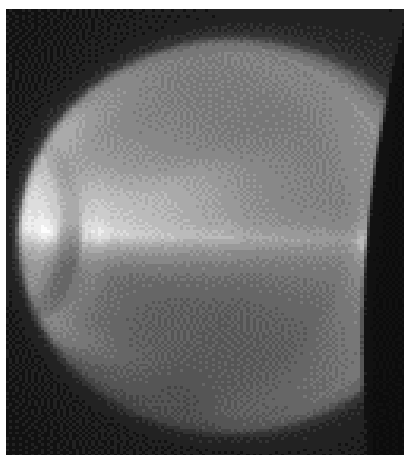


Рис.8. Фотография плазмы на выходе из соленоида установки ГОЛ-НВ до установки кольцевых электродов

3.3 Оценка параметров плазмы по линии C^{2+}

По наличию линии C^{2+} в спектре можно сделать вывод о том, что в плазме существуют ионы двукратно ионизированного углерода. Такие ионы могут существовать в определенном диапазоне температур плазмы. Ниже приведен график, построенный с помощью данных базы NIST (рис. 9), на котором описана зависимость наличия зарядового состояния иона углерода в плазме от температуры при ЛТР. Как уже указывалось в Главе 1, при имеющихся параметрах плазмы использовать модель ЛТР некорректно, однако эти результаты можно принять в качестве грубой оценки температуры плазмы в установке.

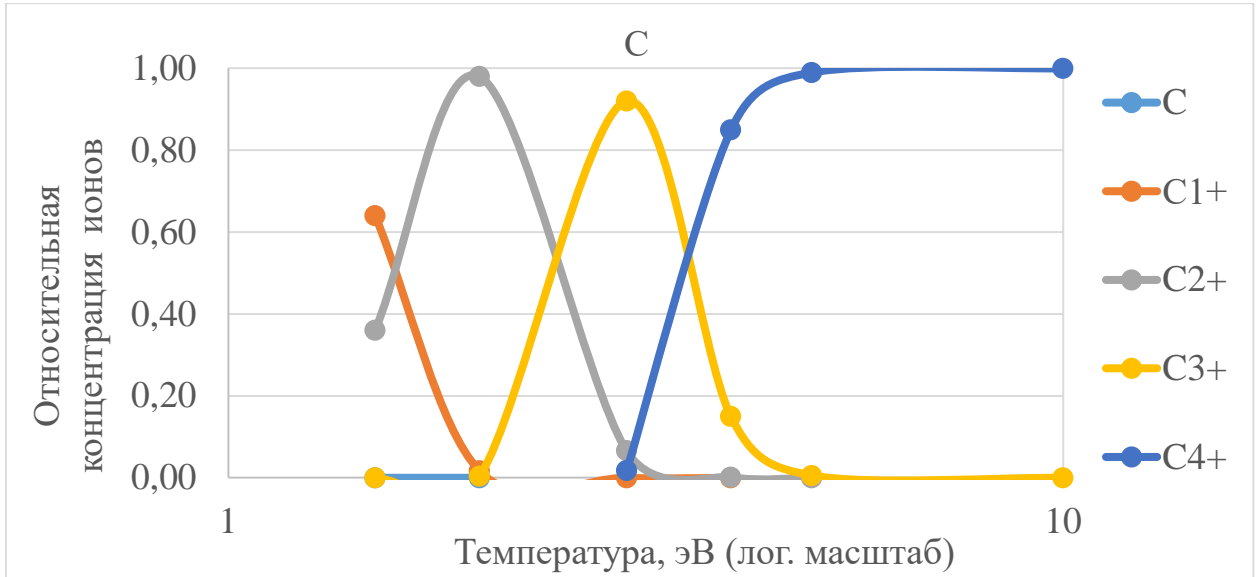


Рис. 9. Зависимость содержания ионов углерода от температуры. Точки – данные базы NIST по модели ЛТР, сплошные линии проведены для визуализации.

Анализ базы данных NIST показал, что наблюдаемая линия двукратно ионизированного углерода складывается из четырех близко расположенных линий (см. Таблицу). Видно, что для появления этой линии требуется возбуждение иона углерода на достаточно высокий уровень (энергия возбуждения многократно превышает электронную температуру). Поэтому, скорее всего, возбуждение данного уровня производится при столкновениях с быстрыми электронами, имеющими энергию порядка потенциала катода плазменной пушки.

Таблица. Спектральные линии C^{2+} .

Длина волны	Отн. инт.	A_{ki} , c^{-1}	E_i , эВ	E_k , эВ	Верхний уровень: конфигурация, терм, J			Нижний уровень: конфигурация, терм, J		
464.74	600	7.26e+07	29.53	32.20	$1s^2 2s 3s$	3S	1	$1s^2 2s 3p$	3P	2
465.02	520	7.25e+07	29.53	32.20	$1s^2 2s 3s$	3S	1	$1s^2 2s 3p$	3P	1
465.14	375	7.24e+07	29.53	32.19	$1s^2 2s 3s$	3S	1	$1s^2 2s 3p$	3P	0
466.58	200	6.78e+07	38.22	40.88	$1s^2 2p 3s$	3P	2	$1s^2 2p 3p$	3P	2

3.4 Спектр излучения плазмы после установки кольцевых электродов

В начале 2019 г. в концевой бак с источником плазмы установки ГОЛ-NB для стабилизации разряда была установлена система кольцевых электродов, представляющая собой пять изолированных колец разного диаметра – см. рис. 10. Материал, из которого состоят кольца – молибден. Электроды находились под плавающим потенциалом во время эксперимента. После установки электродов плазменный шнур стал более отчетливым и перестал задевать стенки камеры – см. рис. 11.



Рис.10. Система кольцевых электродов

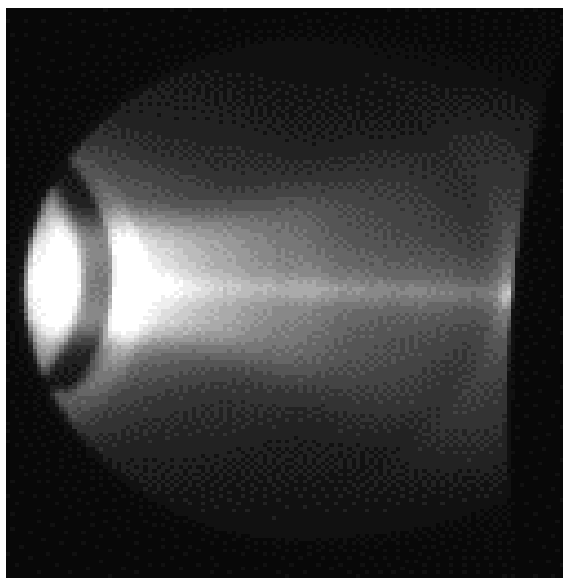


Рис.11. Фото плазменной струи после установки кольцевых электродов

В этом режиме интенсивность линий примесей упала ниже порога чувствительности спектрометра. Плазма стала светиться красным цветом, в видимом спектре доминировали водородные линии. Большинство экспериментов проводилось с включением спектрометра через 1 мс от начала импульса. В этот период времени была ярко видна единственная линия H_{α} – см. рис. 12. Оценка сверху уровня яркости прочих линий по отношению к яркости линии H_{α} составляет $I/I_{H_{\alpha}} < 1,3 \times 10^{-4}$. В конце импульса плазменной пушки, на стадии уменьшения разрядного тока, наблюдается появление линии H_{β} и других линий серии Бальмера – см. рис. 13.

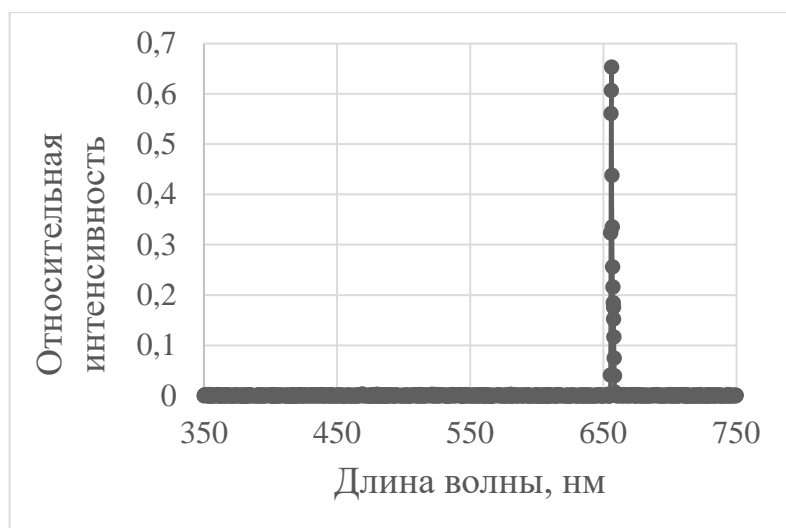


Рис.12. Спектр излучения плазмы после установки кольцевых электродов (измерено при $t = 1$ мс).

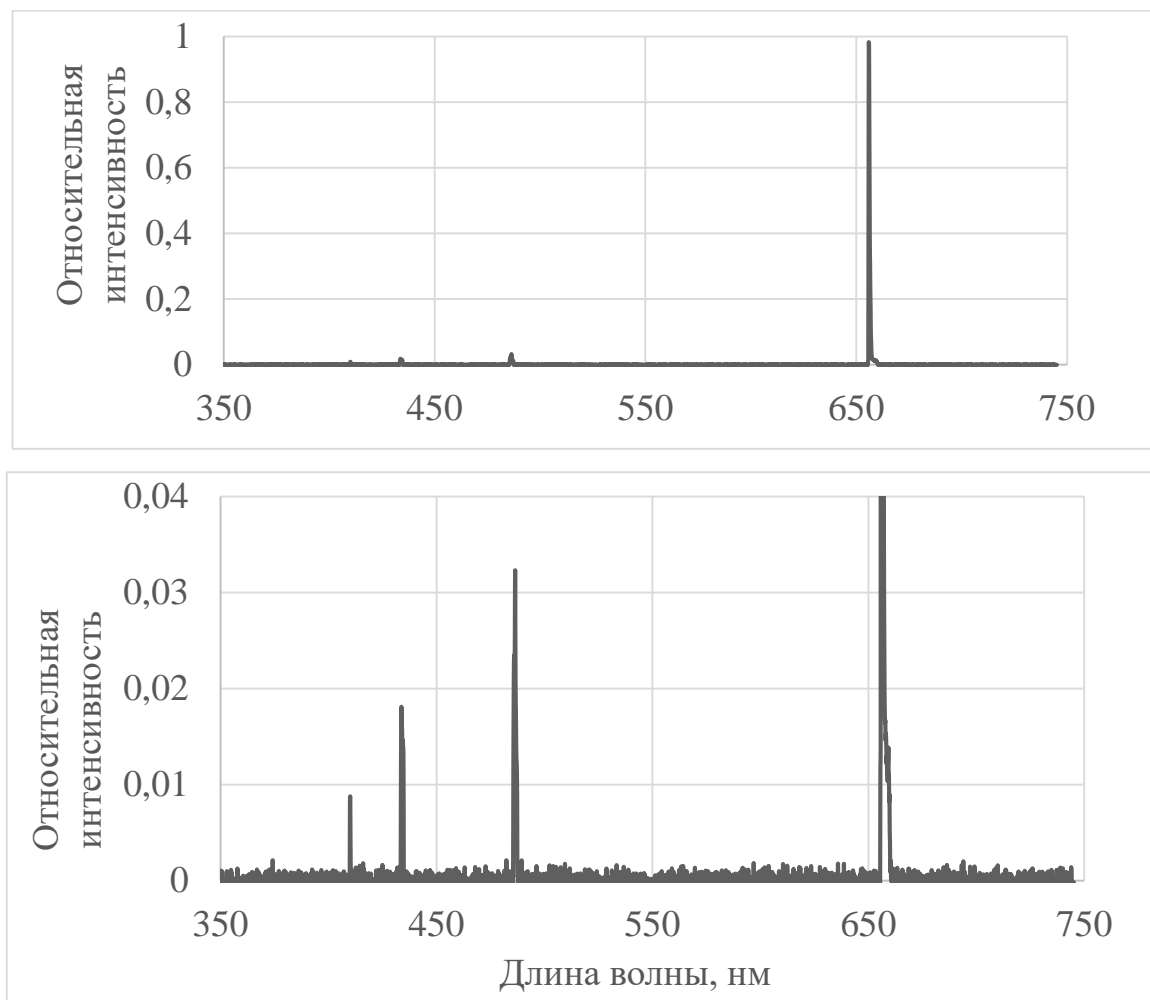


Рис. 13. Спектр излучения плазмы после установки кольцевых электродов (измерен при $t = 2$ мс), показан в полном и увеличенном масштабе.

3.5 Динамика спектра в зависимости от времени относительно разряда

На графиках (рис. 14 и рис. 15) представлены зависимости интенсивностей линий H_{α} и H_{β} от момента после начала разряда, в который проводились измерения. Горизонтальная погрешность соответствует времени экспозиции спектрометра, вертикальная – дисперсии по трем импульсам в одинаковом режиме. Световод спектрометра находился в баке с плазменной пушкой.

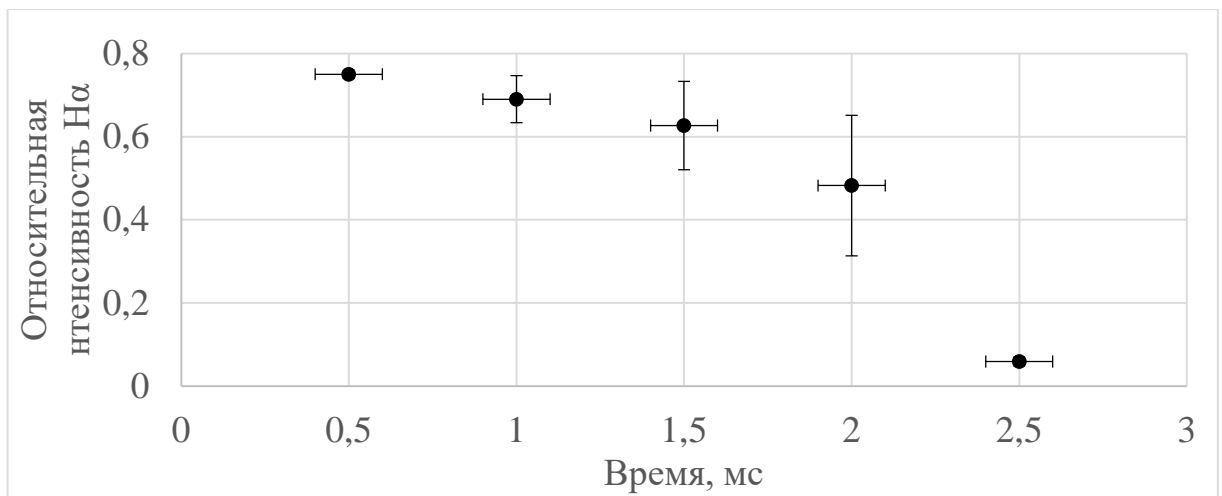


Рис.14. Относительная интенсивность H_{α} в зависимости от времени

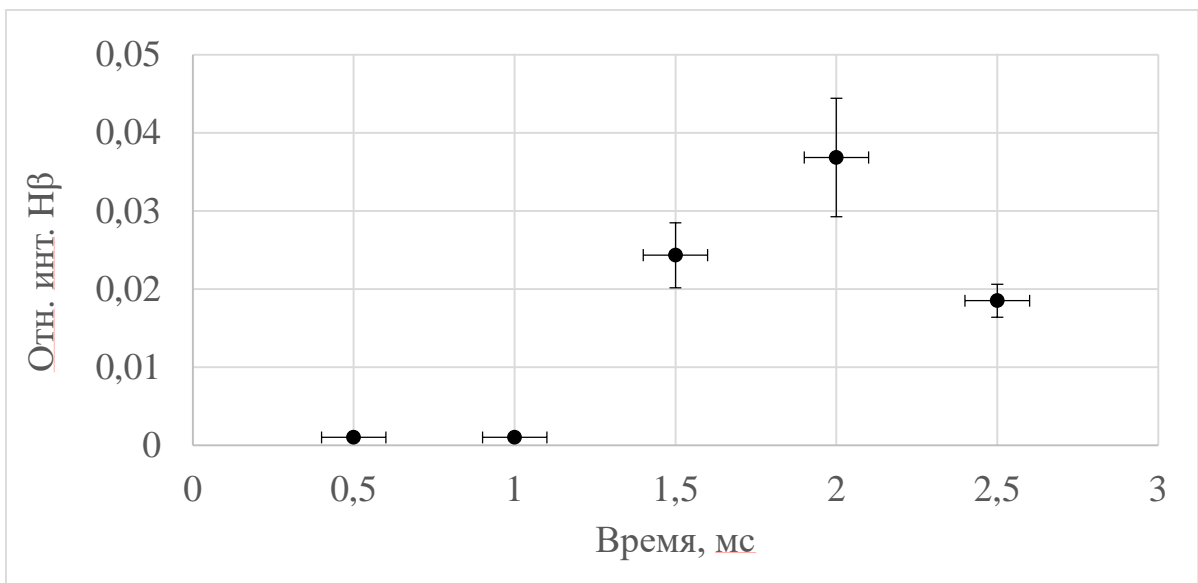


Рис. 15. Относительная интенсивность H_{β} в зависимости от времени

Как видно из графиков, интенсивность спектральных водородных линий изменяется в зависимости от времени измерения относительно тока разряда. На появление возбужденных атомов, которые впоследствии излучают, влияют такие процессы, как рекомбинация и перезарядка на холодных атомах нейтрального газа установки. Роль этих процессов такова, что сначала доминирует перезарядка на холодном нейтральном газе, из-за чего ярче всего светится линия H_{α} , а прочие линии в спектре отсутствуют. Потом, когда ток разряда начинает уменьшаться при продолжающемся росте давления нейтрального газа, плазма начинает рекомбинировать и происходит захват электронов на более высокие уровни с появлением более высоких линий серии Бальмера.

Глава 4. Исследование состава нейтрального газа

Состав примесей в плазме отчасти определяется остаточным газом в вакуумной камере установки. Чтобы узнать, какие элементы и с какой концентрацией входят в остаточный газ, нужно провести анализ с помощью масс-спектрометра. Это даст нам дополнительные знания о примесях в плазме.

4.1 Устройство и принцип действия масс-спектрометра

Для измерения масс-спектра использовался квадрупольный масс-спектрометр модели MKS e-vision, схема подобного прибора показана на рисунке 16[6]. Диапазон масс, в котором измеряет масс-спектрометр-от 1 до 100 а. е. м.

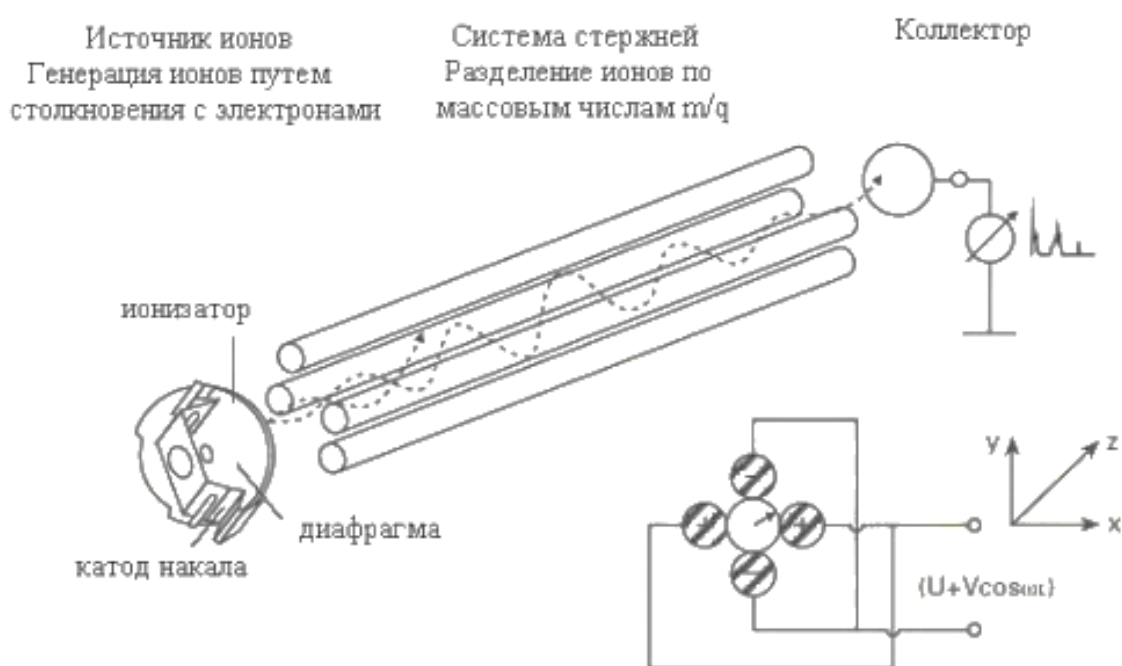


Рис. 16. Схема квадрупольного масс-спектрометра

4.2 Масс-спектр до и после выстрела

В ходе измерений с помощью масс-спектрометра были получены масс-спектры, по которым можно определить состав нейтрального газа в камере. На масс-спектрах преобладают линии воды ($M=18$), молекулярного и атомарного азота ($M=28$ и 14), молекулярного и атомарного кислорода ($M=32$ и 16), аргона ($M = 40$) и линия соответствующая $M = 44$ (это может быть углекислый газ

или углеводород типа пропана). На графиках ниже (рис. 17 и рис. 18) изображены масс-спектры до и после выстрелов. На масс-спектре после выстрела виден водород-рабочий газ. Масс спектр снимался в среднем за 10 секунд до выстрела и через 10 секунд после выстрела.

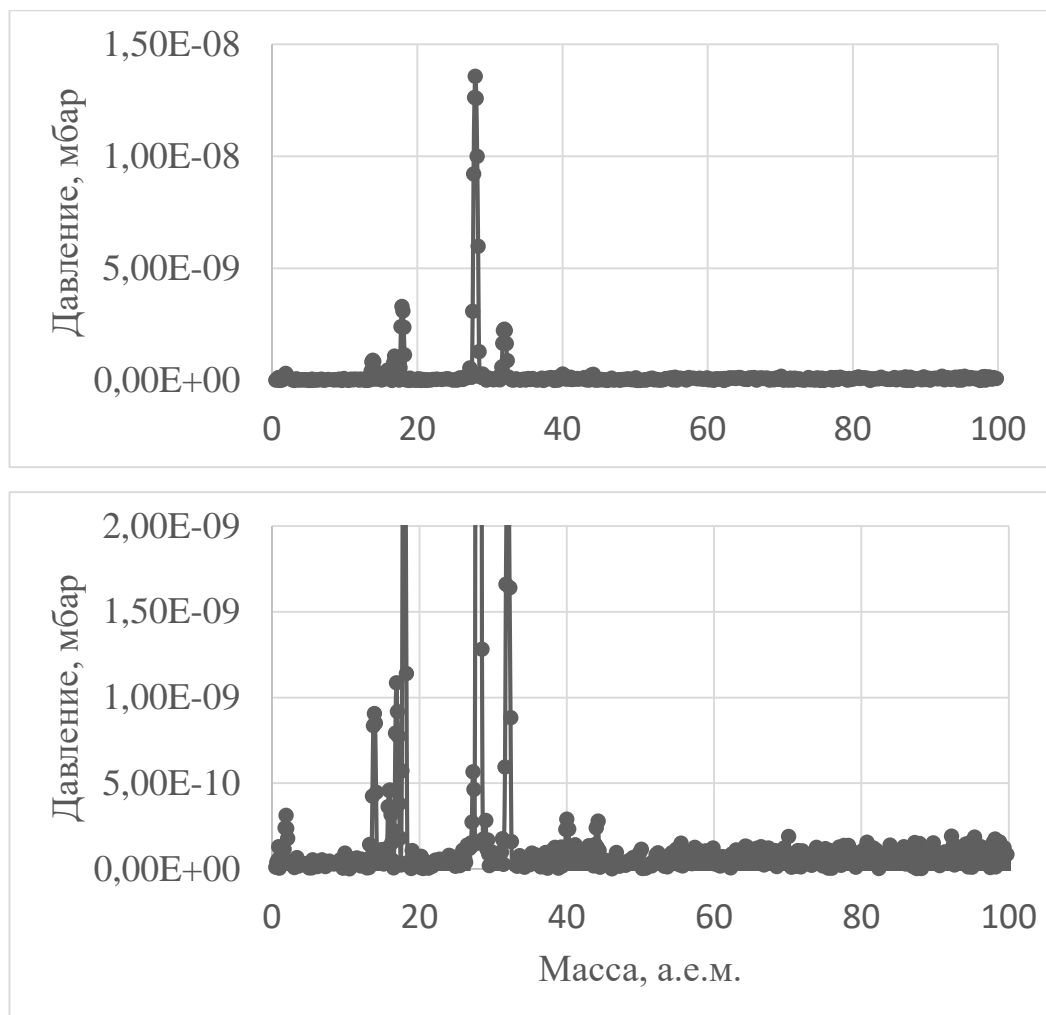


Рис. 17. Масс-спектр до выстрела в полном и увеличенном масштабах

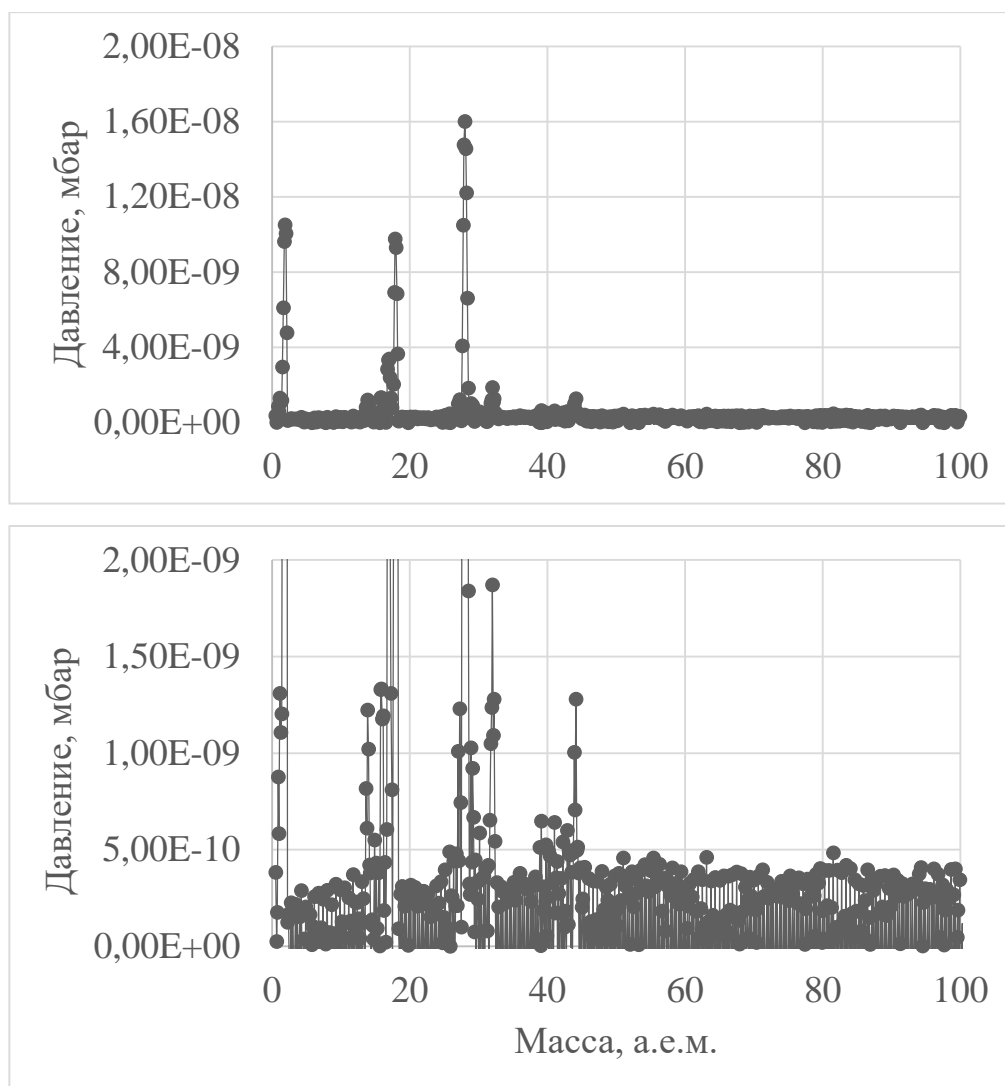


Рис. 18. Масс-спектр после выстрела в полном и увеличенном масштабах

4.3-Динамика концентрации примесей после выстрела

Помимо масс-спектра, спектрометр модели MKS e-vision позволяет измерять динамику нескольких типов ионов с выбранными массами с временным разрешением около 1,3 с. Результаты измерения динамики концентраций основных примесей приведены на рис. 19.

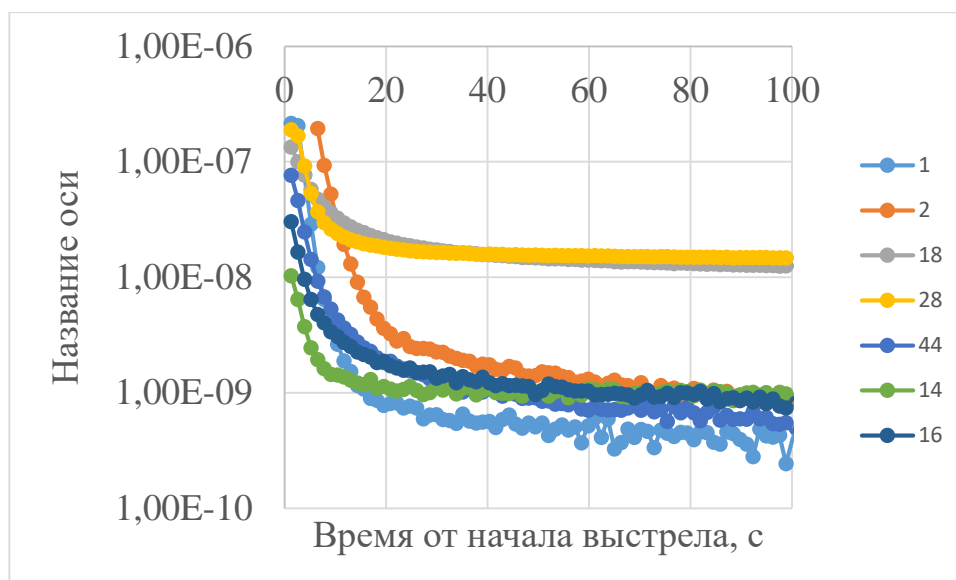


Рис. `19. Кривые откачки для разных масс

Для измерения скорости откачки использовались данные об изменении концентрации разных масс в зависимости от времени. Расчет проводился с помощью аппроксимации кривой откачки функцией вида $A + B \cdot e^{-cx}$, $c = S/V$, где S – скорость откачки, а V – объем вакуумной камеры установки, равный 3 м^3 .

Для атомарного водорода скорость откачки равна 1800 л/с , для молекулярного водорода – 1690 л/с , для кислорода – 2500 л/с , для азота – 2210 л/с , для паров воды – 1560 л/с , для массы с $M = 44$ – 1170 л/с . Откачка установки производится двумя насосами Shimadzu TMP-3403LMC с паспортной производительностью 2400 л/с по водороду и 3300 л/с по азоту. В целом полученные данные соответствуют ожидаемой скорости откачки с учетом конструкции установки.

Заключение

В работе было проведено изучение примесей в плазме установки ГОЛ-NB при помощи двух независимых методик: спектроскопии в видимом диапазоне и масс-спектрометрии. Получены оптические спектры и масс-спектры в различных режимах работы установки. Было показано, что для ионов, имеющих наиболее яркие линии в спектре, в плазме установки ГОЛ-NB реализуется тип равновесия, более близкий к корональному. По спектрам определен состав примесей при разных условиях эксперимента. Показано, что после монтажа секционированного плазмоприемника и защитного лимитера, в спектре свечения плазмы наблюдаются только линии водорода, оценена роль процессов рекомбинации и перезарядки на разных стадиях плазменного разряда. Измерены скорости откачки разных газов из вакуумной системы установки.

Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю Поступаеву В.В., Иванову И.А., Инжеваткиной А.А. и коллективу установки ГОЛ-NB.

Список литературы

- 1) И.А. Котельников, Г.В. Ступаков. Лекции по физике плазмы. Учебное пособие. Новосибирск, 1996г
- 2) В. Лохте-Хольтгревен. Методы исследования плазмы. Спектроскопия, лазеры, зонды. Перевод с англ. под ред. С. Ю. Лукьянова. М.: Мир, 1971 год.
- 3) <https://www.nist.gov/pml/atomic-spectra-database>
- 4) <http://grotrian.nsu.ru/ru>
- 5) Бурдаков А. В., Поступаев В. В. Многопробочная ловушка: путь от пробкотрона Будкера к линейному термоядерному реактору // Успехи физических наук. – 2018. – Т. 188. – №. 6. – С. 651-671.
- 6) Postupaev V. V. et al. The GOL-NB program: further steps in multiple-mirror confinement research // Nuclear Fusion. – 2016. – Т. 57. – №. 3. – С. 036012.
- 7) <https://www.thorlabs.com/>