

**МИНИСТЕРСТВО
ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное агентство
по образованию**

**ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ**

**НОВОСИБИРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

физический факультет

**Квалификационная работа на соискание
степени бакалавра
Кафедра физики плазмы**

Колосов Максим Вячеславович

**Название работы
Применение спектроскопии вакуумного
ультрафиолетового излучения для исследования
поверхностной плазмы на установке ГОЛ-3**

**Научный руководитель
Полосаткин Сергей Викторович**

Новосибирск – 2008 год

Оглавление

1. Введение	
1.1. Постановка задачи.....	3
1.2. Схема установки ГОЛ-3.....	4
2. Схема ВУФ спектрометра	
2.1. Сферическая дифракционная решётка как основной элемент ВУФ спектрометра.....	6
2.2. Схема монохроматора Сейя – Намиока.....	7
3. Компьютерное моделирование схемы ВУФ спектрометра с помощью программы ZEMAX	
3.1. Выбор параметров схемы и цели моделирования.....	9
3.2. Анализ пространственного разрешения.....	10
4. Регистрация ВУФ спектра и калибровка спектрометра	
4.1. Схема установки для регистрации ВУФ излучения.....	13
4.2. ВУФ спектр поверхностной плазмы в экспериментах без мишени и калибровка по длинам волн.....	15
5. ВУФ спектр поверхностной плазмы в экспериментах с углеродной мишенью	
5.1. Спектр и зарядовый состав углерода в плазме.....	20
5.2. Пространственное распределение излучения примесей.....	22
6. Заключение.....	24
7. Благодарности.....	24
Приложение.....	25
Список литературы.....	27

1. Введение

1.1. Постановка задачи

Создание термоядерного реактора для использования энергии синтеза ядер водорода является одной из глобальных задач современной физики. Ключевым вопросом создания такого реактора является выбор материалов конструктивных элементов, находящихся в контакте с горячей плазмой. Для решения этой проблемы на установке ГОЛ-3 проводятся эксперименты по изучению взаимодействия плазмы с поверхностью [1,2]. Главная задача экспериментов – моделирование воздействия горячей плазмы на мишень. Основное внимание уделяется исследованию процессов эрозии мишени под действием потока плазмы и поступления примесей в плазму.

Кроме того, контроль плотности атомов и ионов основных примесей, их пространственного распределения и зарядового состояния является важной задачей при получении и удержании термоядерной плазмы в открытых ловушках и токамаках. Причина в том, что присутствие примесей в плазме приводит к увеличению её эффективного заряда, большим потерям энергии на излучение и уменьшению термоядерного выхода.

Для изучения выше перечисленных явлений используются спектрометры видимого, ультрафиолетового диапазона и другие диагностики. Спектрометр видимого излучения достаточно прост в конструкции и удобен в применении, но видимый диапазон излучения плазмы не содержит многих ярких линий атомов и ионов примесей плазмы, которые находятся в ультрафиолетовой части спектра. Поэтому для повышения информативности спектральных измерений необходимо развитие вакуумных ультрафиолетовых (ВУФ) диагностик.

Целью настоящей работы являлось создание ВУФ спектрометра для исследования пространственных и спектральных характеристик излучения поверхностной плазмы. В связи с тем, что ВУФ излучение поглощается в воздухе, спектрометр для регистрации такого излучения (50 – 200 нм) во время эксперимента должен находиться в вакууме. В связи с этим работа включала в себя создание вакуумной системы для регистрации ВУФ спектра, калибровку и юстировку спектрометра, получение ВУФ спектра поверхностной плазмы, исследование пространственного распределения излучения примесей.

Ранее аналогичные спектрометры применялись для регистрации излучения плазмы из центральной части установки ГОЛ-3 [3], а также в экспериментах на токамаке CASTOR в Праге [4,5]. Спектры, полученные в этих экспериментах (см. Приложение), взяты за основу при расшифровке спектров, полученных в данной работе. Также в указанных выше работах были разработаны методики калибровки ВУФ спектрометра, и исследовано распределение примесей плазмы ГОЛ-3 и CASTOR поперёк плазменного столба.

1.2. Схема установки ГОЛ-3

Схема установки ГОЛ-3 приведена на рис. 1. Водородная плазма создаётся разрядом в продольном магнитном поле. Для нагрева плазмы до температуры 2 – 3 кэВ в неё из ускорителя У-2 инжектируется релятивистский электронный пучок с энергией 1 МэВ. Гофрированное магнитное поле создаётся соленоидом из 110 независимых катушек.

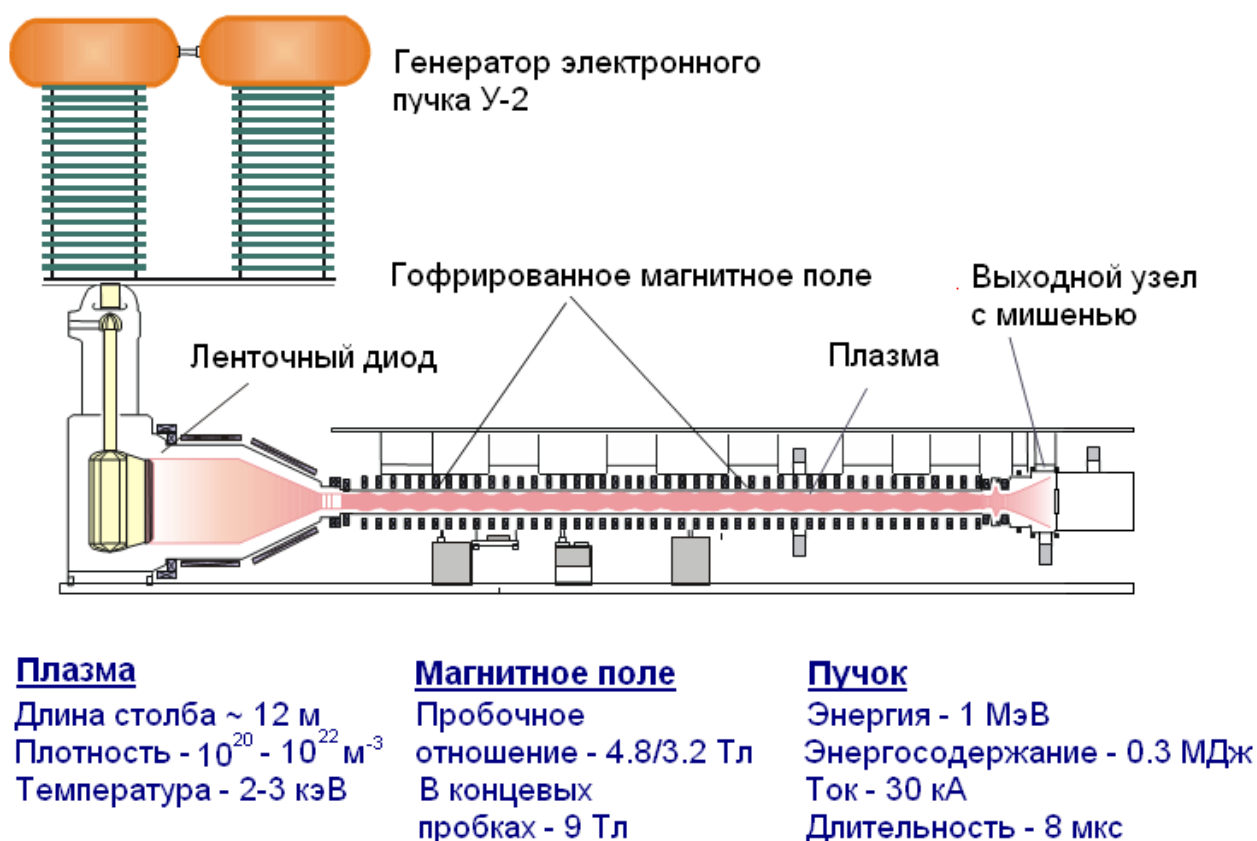


Рис. 1. Схема установки ГОЛ-3

В выходной узел, где устанавливается мишень (Рис. 2), вытекает мощный поток плазмы, вызывающий эрозию мишени и поступление примесей в основную плазму. Для исследования динамики этого движения ВУФ спектрометр следует расположить таким образом, чтобы исследовать пространственное распределение излучения по оси, перпендикулярной мишени.

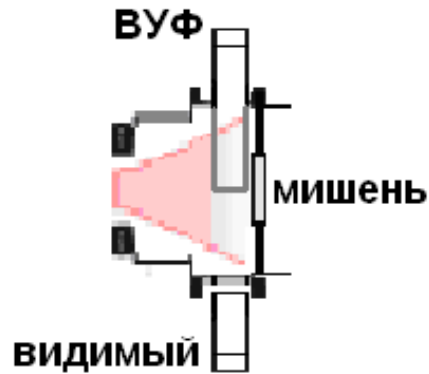


Рис. 2. Расширитель ГОЛ-3. Пространственное разрешение ВУФ спектрометра – по оси, перпендикулярной мишени

2. Схема ВУФ спектрометра

2.1. Сферическая дифракционная решётка как основной элемент ВУФ спектрометра

В связи с отсутствием материалов, прозрачных для ВУФ диапазона, в схеме ВУФ спектрометра могут быть использованы только отражающие элементы. В частности, хорошо подходит предложенная Роуландом ещё в 1882 году дифракционная решётка со штрихами на сферическом зеркале. Она сочетает в себе свойства плоской дифракционной решётки и фокусирующего элемента.

Считая, что размеры решётки малы по сравнению с радиусом кривизны r , проведём через центральную точку решётки круг, перпендикулярный штрихам, диаметр которого равен радиусу кривизны решётки. Пусть A и B – два соседних штриха решётки (рис. 3).

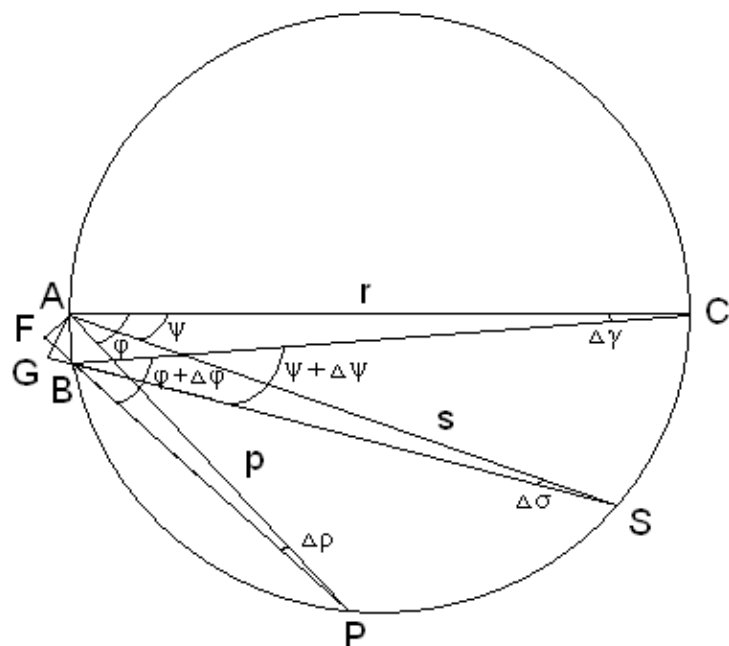


Рис. 3. Круг Роуланда

Рассмотрим ход монохроматических лучей, падающих на решётку из точки S , лежащей на круге. Условие дифракции означает, что разность хода лучей должна равняться целому числу длин волн:

$$(SA + AP) - (SB + BP) = k\lambda,$$

где k – порядок дифракции. Продлеваем лучи SB и PB так, чтобы $SG = SA$, $PF = PA$, тогда

$$(SA + AP) - (SB + BP) = BG + BF.$$

Углы AFB и AGB мало отличаются от прямых, с той же точностью

$$\angle FAB \approx \varphi, \text{ а } \angle GAB \approx \psi, \text{ поэтому } BG \approx AB \cdot \sin(\psi), \text{ } BF \approx AB \cdot \sin(\varphi), \text{ тогда}$$

$$t(\sin(\psi) + \sin(\varphi)) = k\lambda, \quad (1)$$

где $t = AB$ – шаг решётки.

Полученная формула (1) аналогична условию максимумов для плоской дифракционной решётки. Более подробные выкладки приведены в [6].

Теперь покажем, что вогнутая решётка обладает фокусирующими свойствами. Продифференцируем уравнение (1) по φ и по ψ :

$$\cos(\psi) \cdot \Delta\psi + \cos(\varphi) \cdot \Delta\varphi = 0, \quad (2)$$

из рисунка (3) $\psi + \Delta\gamma = \psi + \Delta\psi + \Delta\sigma$, т.е. $\Delta\psi = \Delta\gamma - \Delta\sigma$,

аналогично $\varphi + \Delta\gamma = \varphi + \Delta\varphi + \Delta\rho$, т.е. $\Delta\varphi = \Delta\gamma - \Delta\rho$.

С другой стороны, считая углы $\Delta\gamma$, $\Delta\sigma$ и $\Delta\rho$ малыми, можно написать:

$$\Delta\gamma = \frac{t}{r}, \quad \Delta\sigma = \frac{t}{s} \cdot \cos(\psi), \quad \Delta\rho = \frac{t}{p} \cdot \cos(\varphi).$$

Теперь, выражая $\Delta\varphi$ и $\Delta\psi$, и подставляя в формулу (2), получим:

$$\cos(\psi) \cdot \left(\frac{t}{r} - \frac{t}{s} \cdot \cos(\psi)\right) + \cos(\varphi) \cdot \left(\frac{t}{r} - \frac{t}{p} \cdot \cos(\varphi)\right) = 0.$$

Чтобы последнее уравнение было тождеством, необходимо, чтобы для любых φ и ψ оба слагаемых в левой части были равны нулю, то есть:

$$s = r \cdot \cos(\psi), \quad p = r \cdot \cos(\varphi).$$

Полученные выше соотношения являются системой уравнений круга Роуланда (рис. 3) в полярных координатах. Таким образом, изображением точки, лежащей на круге Роуланда, является также точка, лежащая на этом круге.

Из формулы (1) легко получить выражения для угловой и линейной дисперсии.

Так, для угловой дисперсии получаем:

$$D_\varphi = \frac{d\varphi}{d\lambda} = \frac{k}{t \cdot \cos(\varphi)} = \frac{\sin(\varphi) + \sin(\psi)}{\lambda \cdot \cos(\varphi)}. \quad (3)$$

Из геометрических соображений

$$D_\varphi = \frac{d\varphi}{d\lambda} = \frac{1}{r} \cdot \frac{dl}{d\lambda} = \frac{1}{r} \cdot D_l, \text{ откуда } D_l = r \cdot D_\varphi. \quad (4)$$

2.2. Схема монохроматора Сейя - Намиока

Существует несколько схем монохроматоров с использованием вогнутой решётки. Для ВУФ спектра часто применяется схема Сейя – Намиока (рис. 4). Изображение источника излучения 1 на щели 2 фокусируется и разлагается в

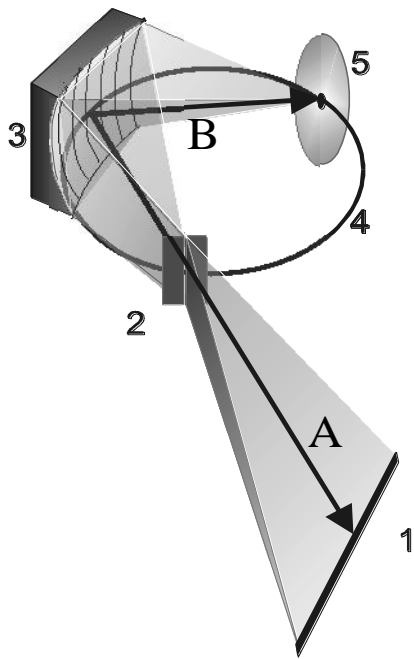


Рис. 4. Монохроматор Сейя -
Намиока

Точечный источник излучения фокусируется в вертикальную линию в горизонтальном фокусе и горизонтальную линию в вертикальном фокусе. Для получения пространственного разрешения необходимо, чтобы вертикальный и горизонтальный фокусы совпадали, что имеет место при $A \approx 3B$ (рис.4).

Таким образом, можно получить в плоскости детектора спектр излучения по горизонтальной координате и пространственное распределение интенсивности линий по вертикальной координате.

спектр решёткой 3 на детектор 5. Угол между падающим и отражённым лучами выбран $70^{\circ}15'$, так как при повороте решётки (для изменения регистрируемого диапазона длин волн) щель и детектор сходят с круга Роуланда 4, но при таком выборе угла фокусировка ухудшается наименьшим образом. То есть для сканирования по спектру достаточно поворачивать дифракционную решётку.

Такая оптическая схема обладает значительным астигматизмом, не позволяющим получать в плоскости регистрации изображение входной щели.

3. Компьютерное моделирование схемы ВУФ спектрометра с помощью программы ZEMAX

3.1. Выбор параметров схемы и цели моделирования

При создании системы для регистрации спектра необходимо знать, каким параметрам должна удовлетворять эта система, чтобы с её помощью можно было решать поставленные задачи.

Так как целью работы является получение пространственного распределения интенсивности излучения поверхностной плазмы, то главная задача моделирования – исследование возможностей пространственного разрешения монохроматора Сейя – Намиока на разных длинах волн ВУФ диапазона.

На рисунке 5 приведены три основных окна программы ZEMAX, с помощью которой проводилось компьютерное моделирование.

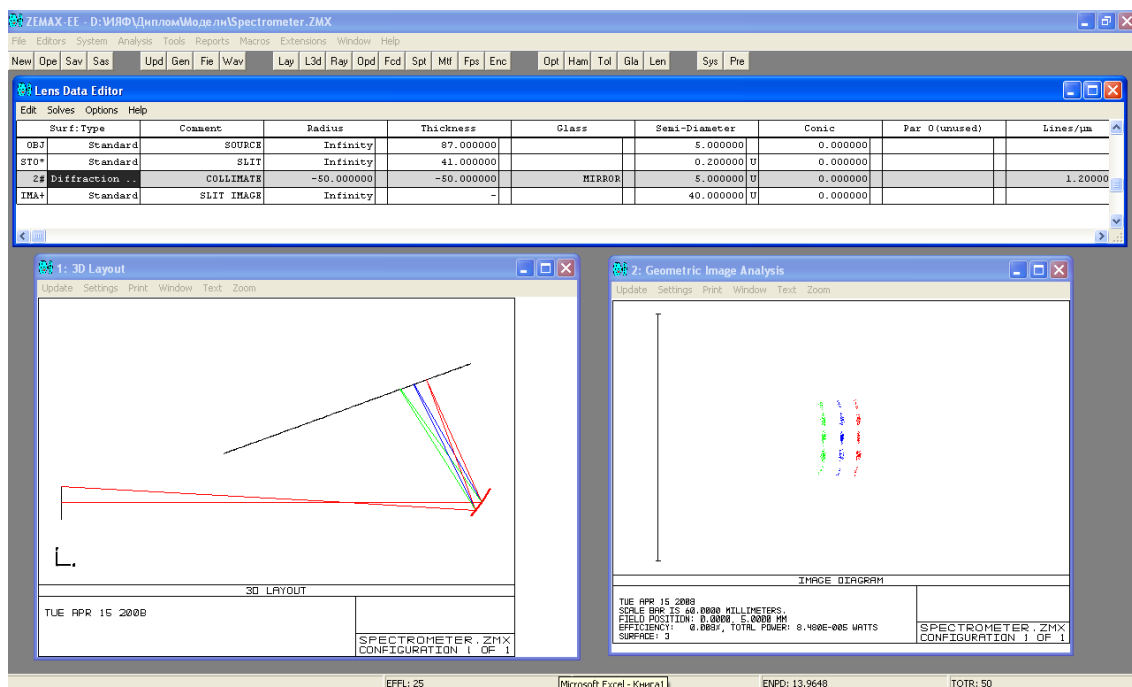


Рис. 5. Программа ZEMAX

Lens Data Editor – окно с таблицей для ввода элементов оптической схемы и их параметров: радиус кривизны, расстояние до следующего элемента и т.д.; 3D Layout – окно, в котором изображается геометрический ход лучей; Geometric Image Analysis – окно с изображением светового пятна на выбранной поверхности (например, на экране детектора).

В Lens Data Editor вводятся следующие параметры. Расстояние между щелью и решёткой – 41 см, между решёткой и экраном – 41 см, между источником и щелью – 87 см. Ширина щели – 0,1 мм. Размер решётки – 1 см x 1 см, на решётке 1200 штрихов на миллиметр. Рассматривается минус первый порядок дифракции. Угол падения на решётку выбирается в зависимости от того, на какую длину волны мы хотим настроиться. Этот угол определяется из двух условий: из условия максимумов (1) и из того, что сумма углов падения и дифракции равна $70^{\circ}15'$.

В нашем случае, для длины волны 121,6 нм получаем:

$$\frac{1}{1,2 \cdot 10^{-3}} \cdot (\sin(\psi) - \sin(\varphi)) = -121,6, \quad \psi + \varphi = 70^{\circ}. \quad (5)$$

Здесь ψ и φ отсчитываются в разные стороны от нормали к решётке. Из решения системы (5) получается, что $\psi \approx 30^{\circ}$.

3.2. Анализ пространственного разрешения

Как указано выше, основная цель моделирования – исследование пространственного разрешения ВУФ спектрометра Сейя - Намиока. Пространственным разрешением спектрометра по выбранной оси в данной работе считается минимальное расстояние между двумя точками на этой оси, при котором эти две точки различимы на выходном изображении.

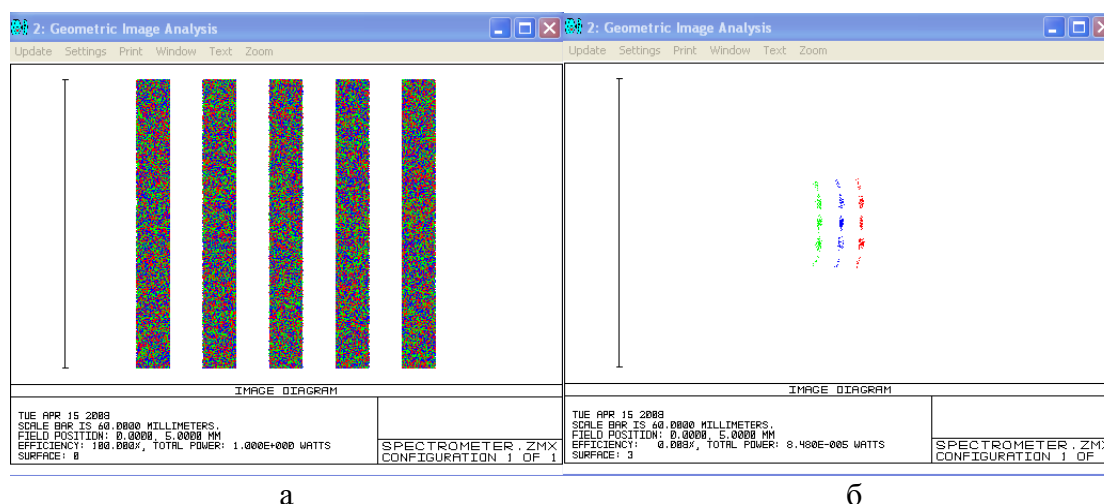


Рис. 6. Изучение пространственного разрешения ВУФ спектрометра, а – источник излучения, б – изображение источника в плоскости детектора (изображение повернуто на 90 градусов)

Для определения этого расстояния брались источники в виде нескольких вертикальных полос, каждая из которых излучает на длинах волн 50 нм, 121,6 нм, 200 нм (рис. 6,а), и моделировалось прохождение излучения от этих источников через оптическую схему спектрометра (рис. 6,б).

Ширина каждой полосы взята равной ширине зазора между полосами.

Изображение на экране представляет себе множество точек, формирующих немного расплывчатое изображение источника. Расстояние между полосами на экране определялось по границам основных сгустков точек.

Взято несколько источников излучения вида рис. 6,а, в каждом следующем из которых зазор между полосами и ширина полосы выбраны на несколько миллиметров либо долей миллиметров меньше, чем в предыдущем. Для каждого источника посчитано среднее расстояние между полосами на экране: измерено расстояние между разными парами полос для разных длин волн и посчитано среднее значение.

Результаты этих подсчётов для длины волны 121,6 нм приведены в таблице 1. В левой колонке таблицы – ширины зазоров между полосами, в правой колонке – средние ширины зазоров между полосами в спектре.

Таблица 1. Анализ пространственного разрешения спектрометра

Зазор между полосами источника, мм	Зазор между полосами на экране, мм
6,7	2,1
4,6	1,5
4	1,3
3,5	1,1
3,2	Плохо различимо

Из таблицы 1 видно, что изображение источника на детекторе меньше самого источника примерно в 3,2 раза. Что вполне понятно, так как сферическое зеркало работает как линза, а отношение расстояния между источником и решёткой к расстоянию между решёткой и детектором как раз равно 3,2.

При зазоре между полосами 3,2 мм становится непонятно, можно ли разрешить полосы на спектральной линии. Поэтому для этого случая построена гистограмма яркости вдоль линии из выходных данных программы.

По полученной гистограмме (рис. 7,б) видно, что полосы различаются (хоть и с трудом). Отношение интенсивности в минимумах и максимумах не больше (а в основном меньше), чем 0,8, поэтому, согласно критерию Рэля, полосы на расстоянии 3,2 мм разрешаются. Следовательно, пространственное разрешение вдоль спектральной линии составляет около 3 мм.

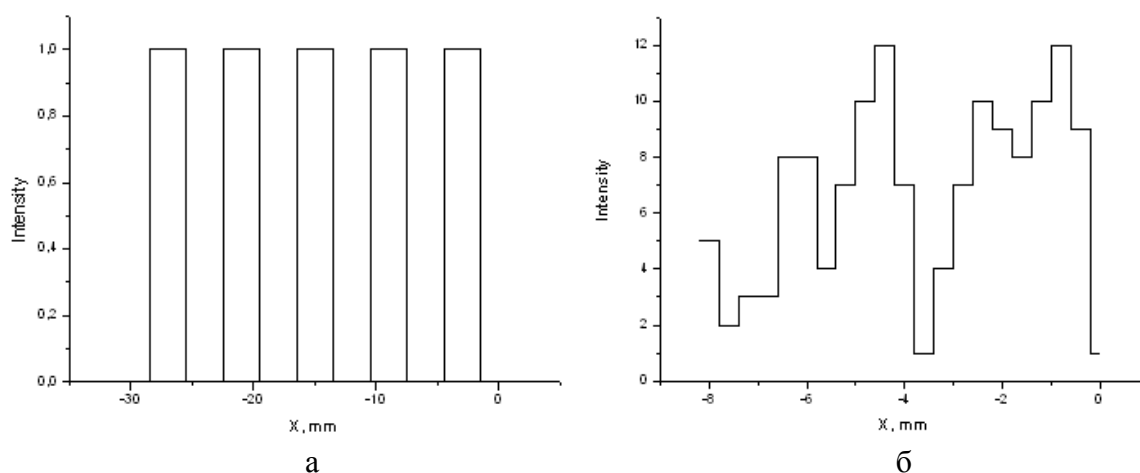


Рис. 7 а, б. Изучение пространственного разрешения ВУФ спектрометра, а (слева) – распределение яркости источника излучения (в условных единицах), б – распределение интенсивности вдоль спектральной линии (в других условных единицах)

4. Регистрация ВУФ спектра и калибровка спектрометра

4.1. Схема установки для регистрации ВУФ излучения

Так как вакуумное ультрафиолетовое излучение поглощается в воздухе, то для получения ВУФ спектра необходимо создание вакуумной системы, согласованной с вакуумной системой основной плазменной установки.

Такая система собрана в результате работы, и её эскиз приведён на рисунке 8. Спектрометр установлен под углом 45 градусов и «смотрит» в область, где находится плазменный столб, причём установлен так, что штрихи решётки параллельны столбу, то есть поле зрения спектрометра – около 10 см вдоль плазменного столба с шагом 3,2 мм. Корпус спектрометра крепится к установке с помощью сильфонового соединения. Откачка из камеры спектрометра производится через отдельную ветвь вакуумной магистрали. Решётка поворачивается специальной ручкой с барабаном, имеющим шкалу, нуль которой соответствует положению решётки, при котором на детектор попадает излучение, отражённое в нулевой порядок дифракции. Регистрируется в основном -1 – й порядок дифракции.

Детектор ВУФ излучения представляет собой систему из электронно-оптического преобразователя (ЭОП) и фотокамеры DC-20 с объективом (рис. 9). ЭОП устроен следующим образом: ВУФ кванты падают на микроканальные пластины (2, 3), на которые подаётся напряжение по 1 кВ на каждую, из них выбиваются электроны и ускоряются в зазоре ~5 мм, на который подаётся напряжение ~5 кВ. Электроны падают на люминофор, он светится в видимом диапазоне, изображая спектр.

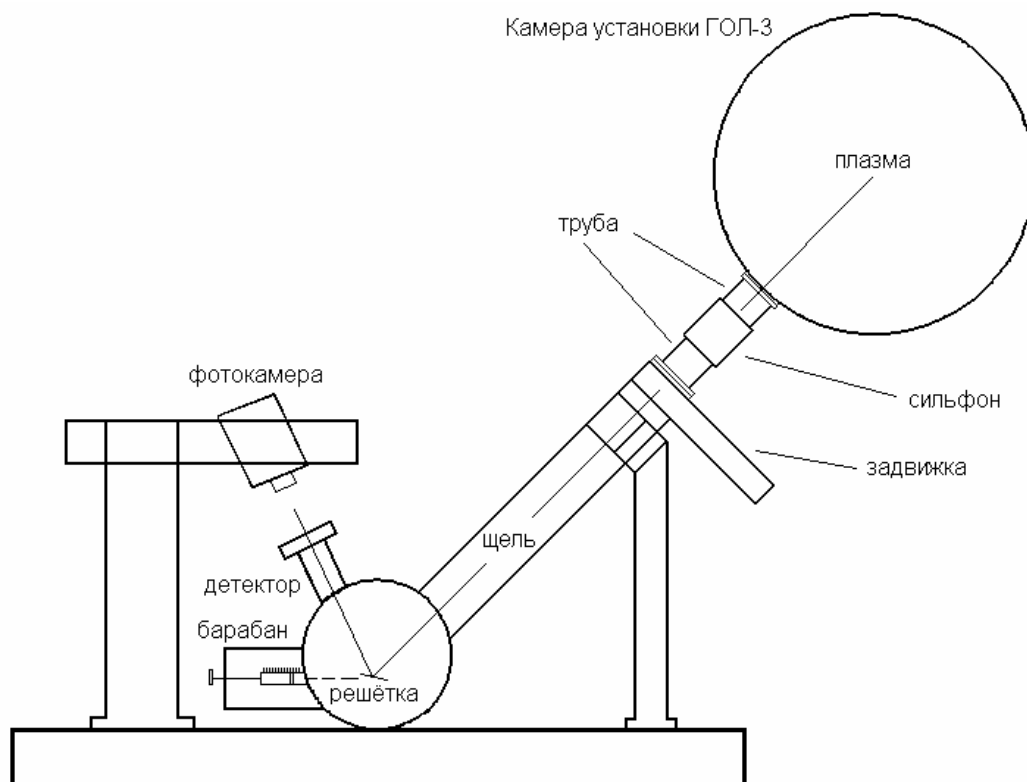


Рис. 8. Система регистрации ВУФ спектра

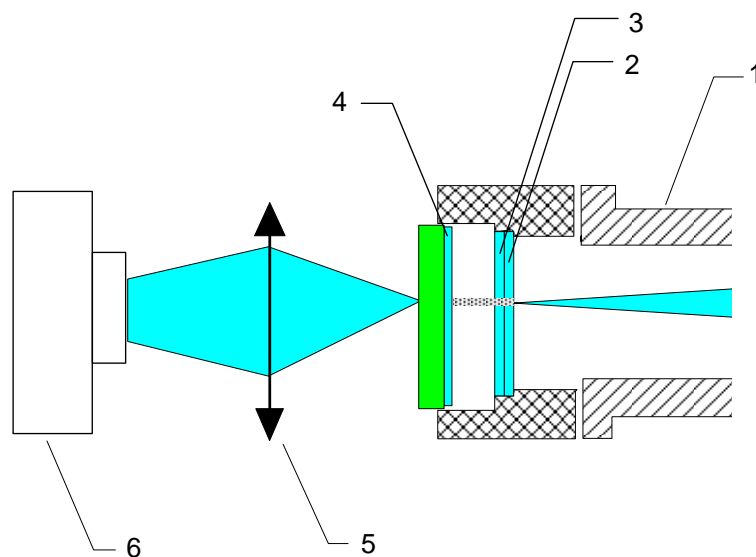


Рис. 9. Детектор ВУФ излучения. 1 – корпус спектрометра; 2,3 – микроканальные пластины, 4 – люминофор, 5 – объектив, 6 – цифровая камера

Изображения спектров регистрировались с помощью цифровой фотокамеры DC-20 с объективом, фокусирующим изображение люминофора на матрицу

камеры. Время экспозиции камеры – 1/30 секунды. Размер ПЗС матрицы – 500 на 240 пикселя. На кадре изображался участок люминофора размером около 4 на 3 см (т.е. разрешение камеры – около 0,1 мм/пиксель). Снимки передавались в компьютер в двух разных форматах: .tif – фотографии для просмотра (с амплитудой в логарифмическом масштабе) и .dc2 – для цифровой обработки (с амплитудой в линейном масштабе). Перед экспериментами с мишенью камера DC-20 была заменена на камеру SDU, матрица которой меньше подвержена влиянию рентгеновского излучения.

4.2. ВУФ спектр поверхностной плазмы в экспериментах без мишени и калибровка по длинам волн

Калибровка ВУФ спектрометра по длинам волн состоит в определении двух параметров: коэффициента для перевода делений барабана механизма перестройки монохроматора (угла поворота решётки) в единицы длин волн и определения шкалы длин волн на изображениях, полученных с помощью системы ЭОП - CCD.

Пусть D – это число нанометров, на которое сдвигается шкала длин волн при повороте решётки на одно деление, C – число нанометров, приходящееся на 1 пиксель на снимке.



Рис. 10 а, б. Изображения спектра в двух экспериментах (без электронного пучка); а – эксперимент 8532, положение барабана 20.00; б (справа) – эксперимент 8533, положение барабана 16.00 (здесь и далее в разделе 4.2 снимки формата .tif инвертированы в программе Adobe Photoshop)

По смещению одних и тех же линий на изображении спектров при разных положениях барабана (рис. 10) можно определить отношение параметра C к

параметру D. По данным экспериментов 8532, 8533 это отношение равно 2,5 деления барабана на пиксель.

Второе уравнение на С и D может быть получено двумя способами: пересчётом на нулевой порядок дифракции, и на -2 – й порядок. В обоих случаях длину волны одной из линий (удобнее всего L_α) необходимо определить из сравнения со справочными спектрами излучения плазмы (см. Приложение).

На рисунке 11 приведён спектр низкотемпературной плазмы, получаемой в экспериментах без нагрева плазмы релятивистским электронным пучком (такую плазму далее будем называть «предварительной»), снятый в экспериментах 8532, 8533. Предположительная линия L_α обозначена H I.

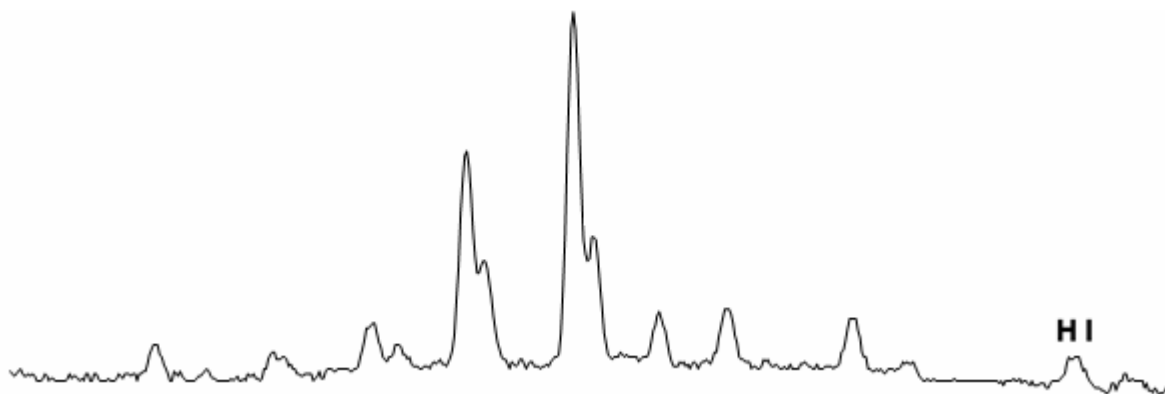


Рис. 11. Спектр предварительной плазмы

Калибровка по нулевому порядку.



Рис. 12. Линия нулевого порядка дифракции

Спектральная линия нулевого порядка дифракции (рис. 12) – это отражённое изображение светящейся щели (не разложенное в спектр). Этой линии формально соответствует длина волны ноль.

Калибруем следующим нехитрым способом. Пусть Δb – разность делений шкалы барабана для регистрации -1 – го и нулевого порядков, Δr – разность

расстояний линии, принятой за L_α , и линии нулевого порядка от края изображения (в пикселях), тогда

$$D \cdot \Delta b + C \cdot \Delta p = 121,6. \quad (6)$$

Зная Δb , Δp и отношение C к D , из формулы (6) находим C и D . В результате по такой калибровке получилось $C = 0,134 \pm 0,004$ нм/пиксель, $D = 0,0537 \pm 0,002$ нм/деление.

Калибровка по -2 - му порядку.

Второй способ калибровки заключается в сопоставлении спектров в -1 – м и -2 – м порядках.

На рисунке 13 изображены два одинаковых участка спектра: верхний – в -1 – м порядке дифракции, нижний (вдвое сжатый по горизонтали и примерно во столько же раз растянутый по вертикали) – в -2 – м порядке.

Выбирая самую яркую линию, калибруем следующим образом. Пусть Δb – разность делений шкалы барабана для регистрации -2 – го и -1 – го порядков, Δp_0 – расстояние выбранной линии от предполагаемой L_α , порядках от края изображения (в пикселях), тогда, считая, что во втором порядке длина волны формально в 2 раза больше, получаем

$$D \cdot \Delta b + C \cdot \Delta p = 121,6 - C \cdot \Delta p_0. \quad (7)$$

Теперь, зная Δp_0 , Δp , Δb и отношение C к D , из формулы (7) находим: $C = 0,134 \pm 0,004$ нм/пиксель, $D = 0,0535 \pm 0,002$ нм/деление.

При пересчёте параметра C на дисперсию по поверхности ЭОП (для этого была сфотографирована миллиметровая бумага) получилось $1,6 \pm 0,1$ нм/мм. Если посчитать линейную дисперсию по формулам (3), (4), получается $1,56$ нм/мм.

Параметр D не зависит от положения камеры относительно ЭОП и размера ПЗС матрицы, а зависит только от параметров спектрометра. Полученное

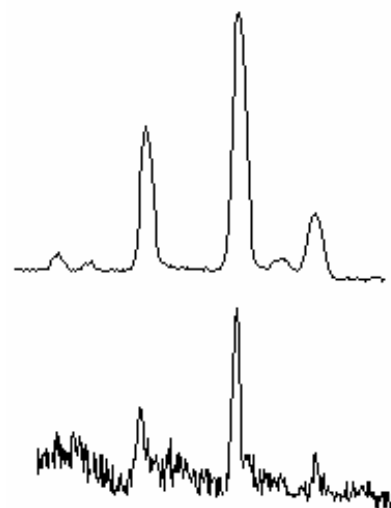


Рис. 13. Верхний график – участок спектра в -1 – м порядке. Нижний график – участок спектра в -2 – м порядке, вдвое сжатый по горизонтали и примерно во столько же раз растянутый по вертикали

значение параметра D с точностью до погрешности совпадает с измеренным ранее.

В итоге, можем считать, что линия L_α определена верно, и калибровка по длинам волн проведена успешно.

Так как при изменении положения камеры и тем более при замене камеры (перед экспериментами с мишенью DC-20 была заменена на SDU) дисперсия по пикселям может меняться, то уточнение калибровки для каждого конкретного эксперимента осуществляется привязкой к известным длинам волн.

Приведём наконец несколько прокалиброванных по длинам волн спектров, полученных в экспериментах без мишени.

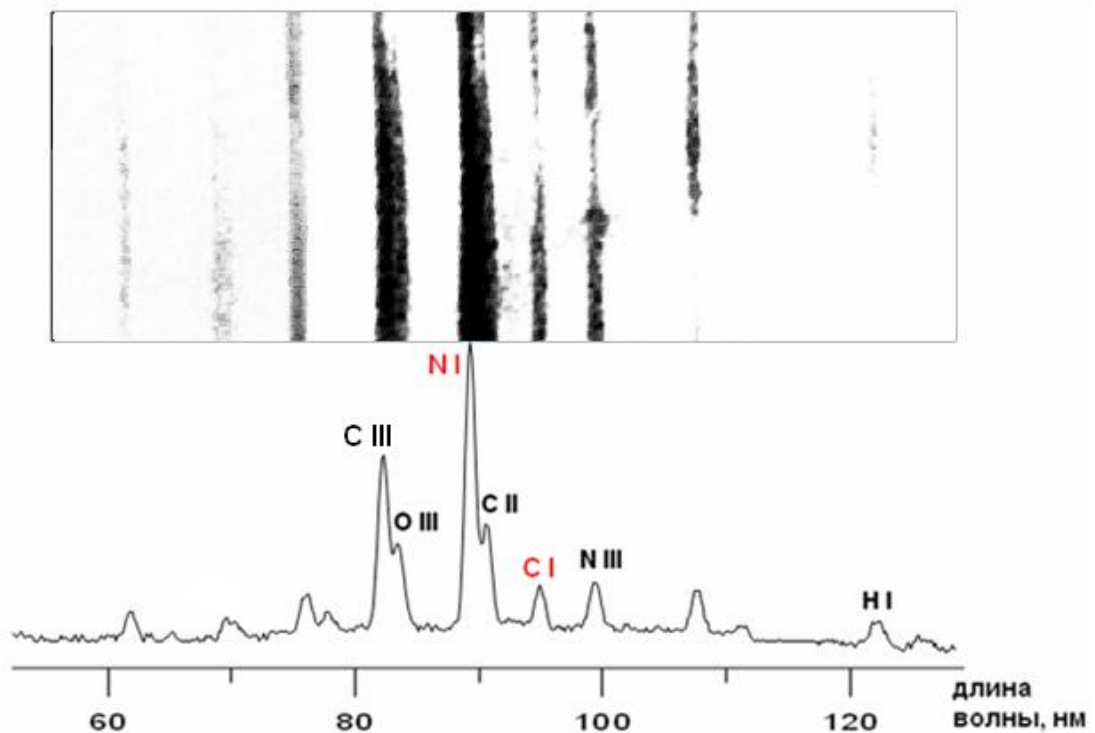


Рис. 14. Спектр предварительной плазмы. Эксперименты 8532-8533 (без мишени)

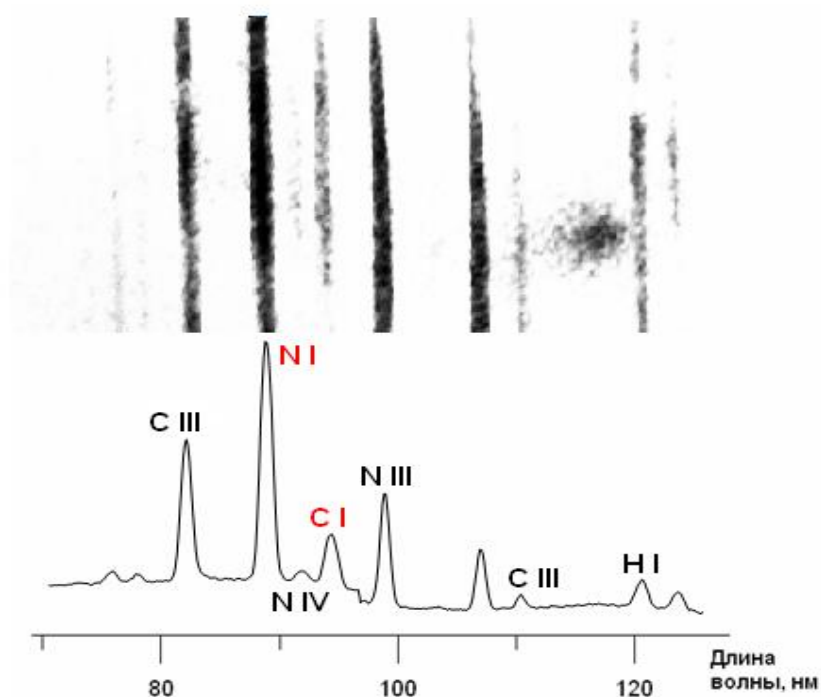


Рис. 15. Спектр предварительной плазмы. Эксперименты 8574, 8591 (без мишени)

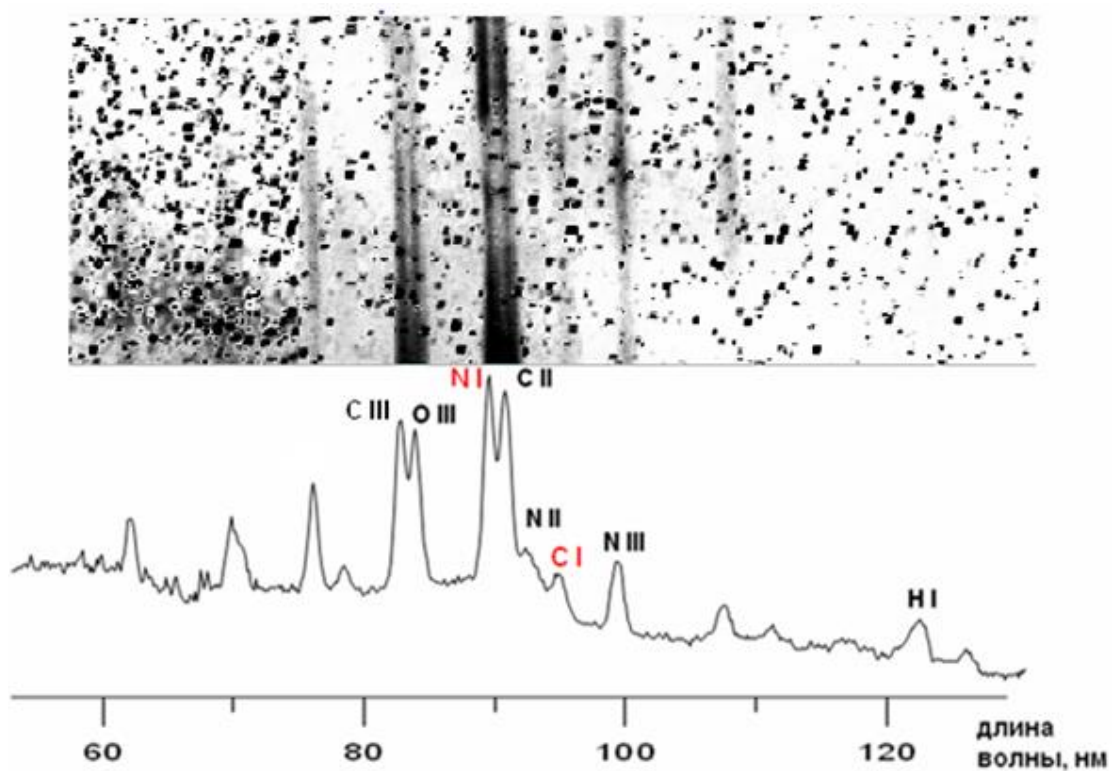


Рис. 16. Спектр плазмы в экспериментах с пучком (8579, 8593, без мишени)

Таблица полученных спектральных линий приведена в приложении.

5. ВУФ спектр поверхностной плазмы в экспериментах с углеродной мишенью

5.1. Спектр и зарядовый состав углерода в плазме

На рисунках 16, 17 приведены спектры, прокалиброванные по длинам волн, полученные в экспериментах с углеродной мишенью.

В спектральном диапазоне 50 – 120 нм зарегистрированы яркие линии однозарядного углерода (90,4 нм, 103,7 нм, 114,2 нм) и двухзарядного углерода (81,8 нм, 97,7 нм). Также присутствует в спектре линия с длиной волны 94,5 нм, наблюдаемая в экспериментах без мишени. Она, возможно, соответствует одному из переходов в атомарном углероде.

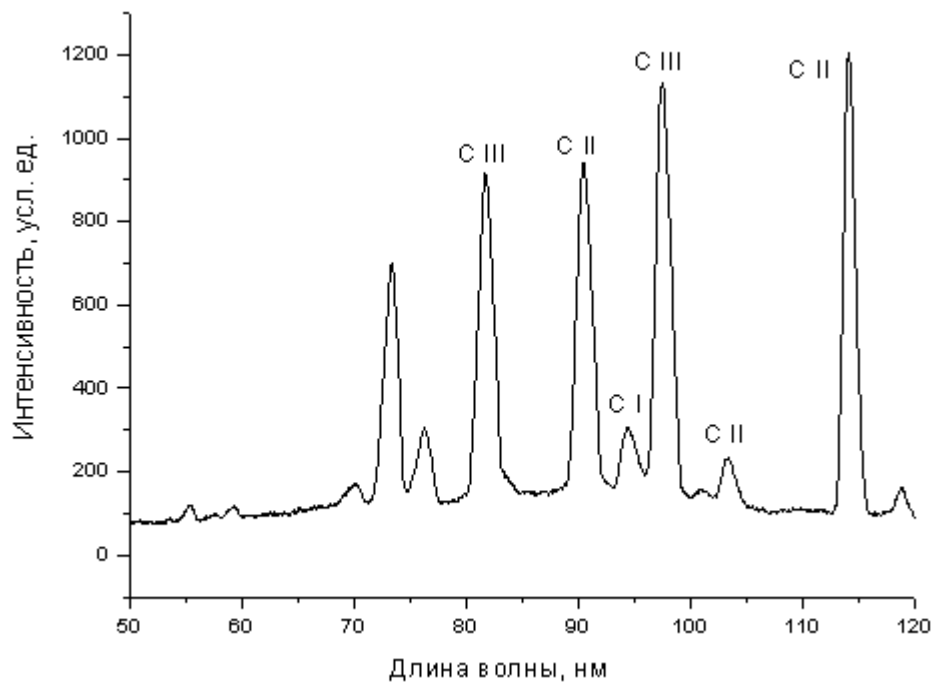


Рис. 16. Спектральные линии углерода в экспериментах с мишенью.

Эксперимент 8704, предварительная плазма

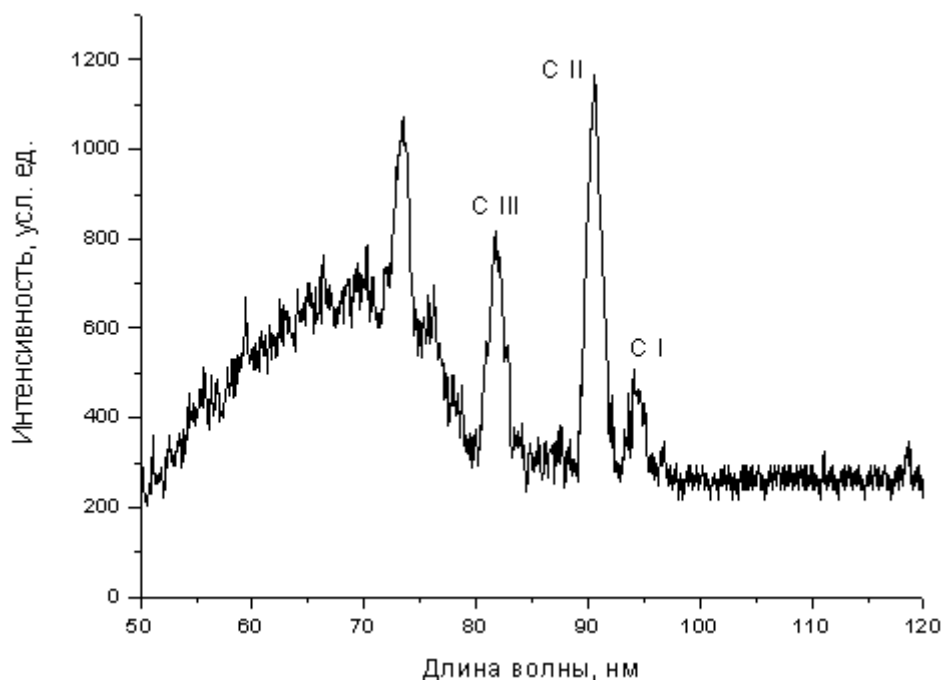


Рис. 17. Спектральные линии углерода в экспериментах с мишенью.
Эксперимент 8707, с пучком

Таблица 2. Линии излучения углерода в экспериментах с мишенью

Длина волны, нм	Заряд иона	Энергии нижнего и верхнего уровней, эВ	Электронные конфигурации
81,8	+2	17 – 32,2	$1s^2 2p^2 - 1s^2 2s3p$
90,4	+1	0 – 13,7	$2s^2 2p - 2s2p^2 (^2P^{\circ} - ^2P)$
94,5	+0 (?)	0 – 13,1	$2s^2 2p^2 - 2s2p^3$
97,7	+2	0 – 12,7	$1s^2 2s^2 - 1s^2 2s2p$
103,7	+1	0 - 12	$2s^2 2p - 2s2p^2 (^2P^{\circ} - ^2S)$
114,2	+1	9,3 – 20,15	$2s2p^2 - 2s^2 4p$

В таблице 2 приведены параметры полученных спектральных линий углерода: зарядность, энергии и электронные конфигурации уровней перехода. Данные взяты из Интернет-справочника NIST Atomic Spectra Database Lines Data [7]. Из таблицы видно, что самым ярким линиям в спектре в основном соответствуют переходы на основной уровень (резонансные линии), что, как

правило, и наблюдается в спектрах излучения плазмы, однако даже на предварительной плазме есть линия (81,8 нм) с верхним уровнем 32,2 эВ.

5.2. Пространственное распределение излучения примесей

Рассмотрим распределение интенсивности излучения вдоль спектральных линий С III (81,8 нм) и С II (90,4 нм) в эксперименте 8707 (с нагревом ионов релятивистским электронным пучком).

На рисунке 18 верхней кривой соответствует распределение интенсивности излучения однозарядных ионов углерода (С II, интенсивность в условных единицах программы для просмотра изображений), нижней линии – то же самое для двухзарядных ионов углерода (С III). По горизонтальной оси за ноль взята точка на оси обзора вблизи мишени и вправо отложено расстояние от этой точки по оси, перпендикулярной мишени, в сторону соленоида (в миллиметрах) с шагом 8 мм.

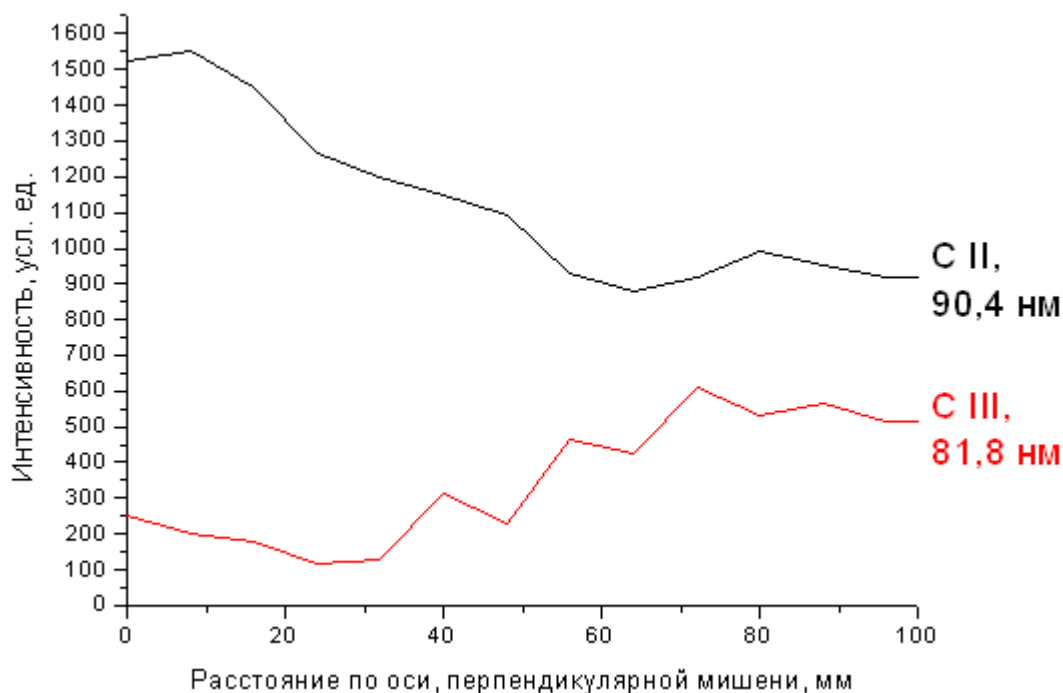


Рис. 18. Пространственное распределение излучения углеродных примесей. Слева – область, близкая к мишени; справа – область, близкая к соленоиду ГОЛ-3

Основной физический результат, извлекаемый из выше приведённых графиков, заключается в градиентах интенсивности излучения примесей.

Величина, отложенная по вертикальной оси, пропорциональна интенсивности излучения. Интенсивность излучения, в свою очередь, пропорциональна плотности соответствующих ионов. Поэтому полученное распределение можно трактовать следующим образом. Мишень при воздействии на неё горячей плазмы подвергается эрозии, причём значительная часть атомов углерода ионизуется электронным ударом (возможно, и перезаряжается с протонами, отдавая электрон) вблизи мишени. В области, близкой к соленоиду, находится более горячая плазма, и то, что однозарядные ионы светятся в ней менее интенсивно, чем возле мишени, а двухзарядные – более интенсивно, чем возле мишени, связано, скорее всего, с тем, что ионы, находящиеся в области более горячей плазмы, имеют более высокий средний заряд (число двукратно-ионизованных ионов увеличивается, однократно-ионизованных - уменьшается).

Таким образом, имеет место проникновение в плазму одно- и двухзарядных ионов углерода, первые из которых при попадании в горячую область плазмы могут переходить во вторые.

6. Заключение

На установке ГОЛ-3 создана система регистрации ВУФ излучения с пространственным разрешением, в том числе вакуумная система, согласованная с вакуумной камерой ГОЛ-3, для диагностики поверхностной плазмы, образующейся при воздействии горячей плазмы и электронного пучка на мишень.

С помощью компьютерного моделирования показано, что пространственное разрешение такой системы составляет около 3 мм участка плазменного столба.

Проведена калибровка спектрометра по длинам волн.

Получен спектр плазмы в расширителе ГОЛ-3 в экспериментах без мишени (в экспериментах без пучка и с пучком). Спектр включает в себя линии атомов водорода, ионов углерода, азота, кислорода с зарядом до трёх (включительно). Большинство линий резонансные.

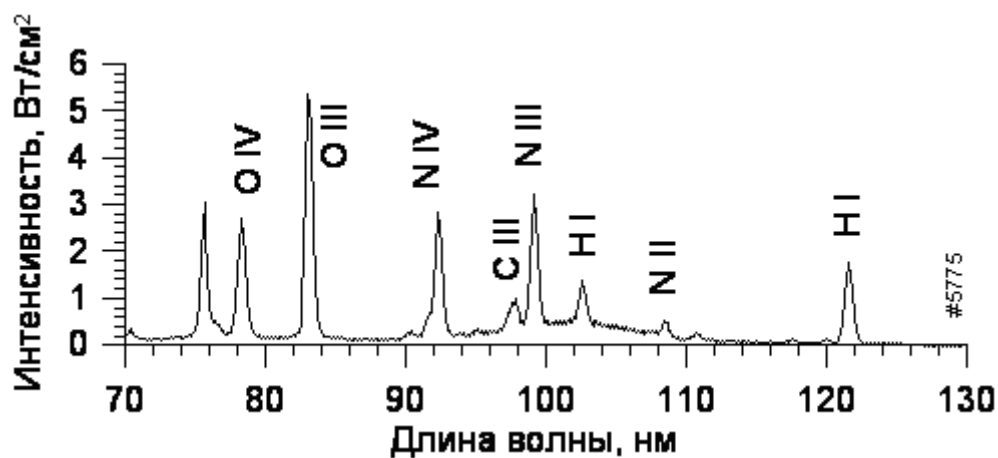
Исследовано пространственное распределение интенсивности излучения углеродных линий по оси, перпендикулярной мишени. Показано, что при проникновении частиц мишени в более горячую плазму средний заряд ионов примесей возрастает.

7. Благодарности

Я выражаю благодарность всей команде ГОЛ-3 за проведение экспериментов. В частности, благодарю заведующего лабораторией А. В. Бурдакова за поставленную задачу, И. А. Иванова - за полезные советы при проведении экспериментов, а также токаря В. А. Синичкина за помощь в технической части создания диагностики ВУФ спектра.

Приложение

Спектр предварительной плазмы на ГОЛ – 3 (2004 г.)



ВУФ спектр плазмы на токамаке CASTOR (Чехия)

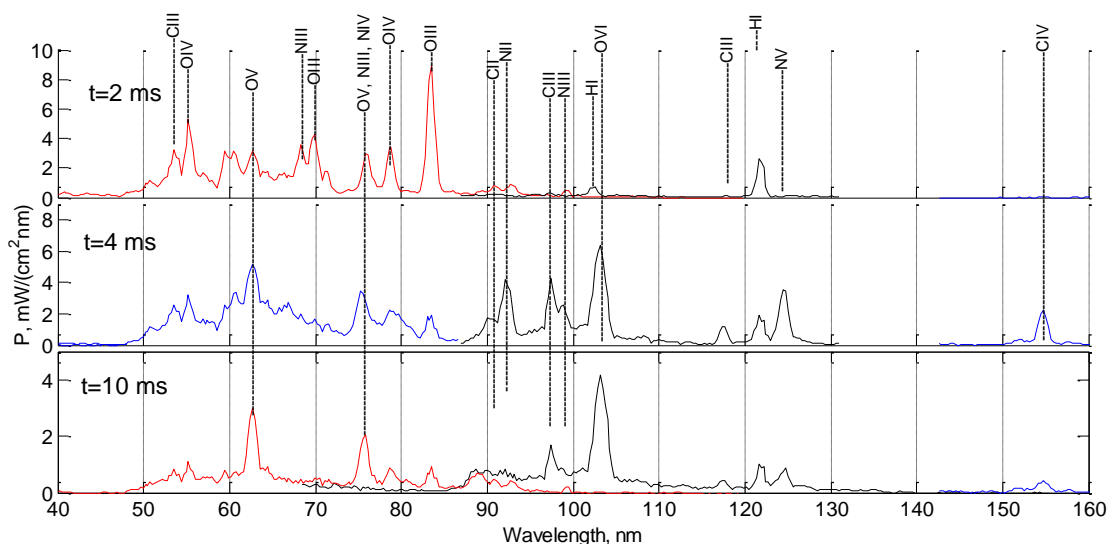


Таблица полученных спектральных линий в экспериментах без мишени на ГОЛ – 3 (февраль – май 2008 г.)

Длина волны, нм	Ион (атом)	Энергии нижнего и верхнего уровней, эВ	Найдена в полученных ранее спектрах
$60,5 \pm 0,6$			
$68,5 \pm 0,4$			
$69,2 \pm 0,3$			

75,2 ± 0,3	Возможно O IV	52 – 68,5	ГОЛ-3
77,6 ± 0,2			
81,8	C III	17 – 32,2	
83,3 – 83,5	O III	0 – 14,9	ГОЛ-3, CASTOR
88,9 ± 0,1	Возможно N I	0 - 14	
90,4	C II	0 – 13,7	ГОЛ-3, CASTOR
91,6	N II	0 – 13,5	ГОЛ-3, CASTOR
92,15 – 92,5	N IV	8,35 – 21,8	ГОЛ-3
94,5 ± 0,2	Возможно C I	0 – 13,1	
99,2	N III	0 – 12,5	ГОЛ-3, CASTOR
107,2 ± 0,25			
111,1	C III	39,6 – 50,8	ГОЛ-3
121,6	H I	0 – 10,2	ГОЛ-3, CASTOR
124,7 ± 0,3			

Список литературы

1. V.T. Astrelin, A. V. Burdakov, P.Z. Chebotarev, V.V. Filippov, V.S. Koidan, K.I. Mekler, P.I. Melnikov, V. V. Postupaev, A. F. Rovenskikh, M.A. Shcheglov Hot electron target interaction experiments at the GOL – 3 facility. // Nuclear fusion, Vol. 37, No 11 (1997), p. 1541 - 1558.
2. С. В. Полосаткин и др. Спектроскопические исследования на установке ГОЛ-3 взаимодействия мощного плазменного потока с твёрдым телом // Приборы и техника эксперимента, 2008, № 2, с. 100-107.
3. S. V. Polosatkin, A. V. Burdakov, V. Piffel, V. V. Postupaev, and Vl. Weinzettl. Investigation of impurity dynamics at GOL-3 facility // Fusion Science and Technology. – 2005.-V.47. – N.1T. - P.267.
4. V. Piffel, Vl. Weinzettl, A. Burdakov, S. Polosatkin Intensity radial profiles of VUV lines near the carbon target in the CASTOR tokamak. // 31st EPS Conference on Plasma Phys. London, 28 June - 2 July 2004 ECA Vol. 28B, P-5.138 (2004).
5. V. Piffel, A. Burdakov, N. Korneva, S. Polosatkin, Vl. Weinzettl Measurement of line radiation power in the CASTOR tokamak. // 33rd EPS Conference on Plasma Phys. Rome, 19 - 23 June 2006 ECA Vol. 30I, P-2.196 (2006).
6. А. Н. Зайдель, Г. В. Островская, Ю. И. Островский, Техника и практика спектроскопии. Москва, «Наука», 1972.
- 7 Интернет - справочник спектральных линий:
http://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html.