

**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**

**Куклин Константин Николаевич**

**Исследование динамики поверхностной плазмы  
по излучению в видимом диапазоне**

**Научный руководитель:  
м.н.с. ИЯФ СО РАН  
Иванов И.А.**

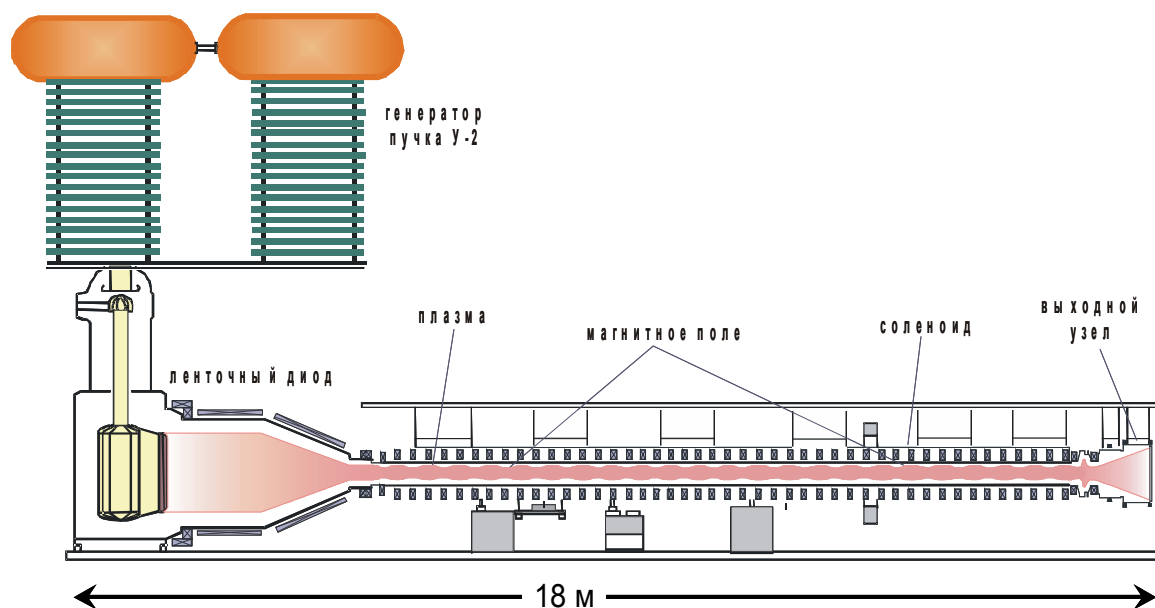
**Новосибирск – 2005 год**

## Оглавление

Введение.....	3
Схема эксперимента.....	8
<i>Калибровка чувствительности ЭОП+ДС-20.....</i>	<i>9</i>
Обработка экспериментальных данных.....	13
<i>Определение температуры поверхности мишени.....</i>	<i>13</i>
<i>Определение линейной плотности плазмы по интенсивности     свечения.....</i>	<i>16</i>
<i>Скорость разлёта облака плазмы.....</i>	<i>17</i>
<i>Определение полного количества испарившихся частиц.....</i>	<i>18</i>
Заключение.....	21
Литература.....	22

## Введение

Одной из альтернативных термоядерных систем с магнитным удержанием является многопробочная ловушка, в которой для увеличения времени жизни плазмы магнитное поле имеет конфигурацию гофрированного соленоида. Эксперименты на установке ГОЛ-3 проводятся с целью изучения физики получения и удержания плотной горячей плазмы в многопробочной магнитной системе. Схема установки приведена на рис. 1. Для нагрева плазмы в неё инжектируется релятивистский



### Электронный пучок

Энергия  $\epsilon$  : 1 МэВ  
Энергосодержание 0.3 МДж  
Ток 30 кА  
Длительность 7 мкс

### Магнитное поле

многопробочное  
 $B_{\max}/B_{\min}=4.8/3.2$  Т  
Длина 12 м

### Плазма

Плотность  $10^{14} \div 10^{16} \text{ см}^{-3}$   
 $T_e, T_i \sim 1 \div 2 \text{ кэВ}$

Рис. 1. Схема установки ГОЛ-3

электронный пучок. Водородная или дейтериевая плазма, имеющая плотность от  $10^{14}$  до  $10^{16} \text{ см}^{-3}$ , создается при помощи специального прямого разряда в продольном магнитном поле. Длина плазменного столба  $\sim 12$  м, средний диаметр - 6 см. Магнитное поле создается соленоидом, магнитная индукция в центральной части равна в максимуме 4.8 Тл, в минимуме 3.2 Тл, поле в концевых пробках - 9 Тл. Для нагрева плазмы в нее инжектируется релятивистский электронный пучок (энергия  $\sim 1$  МэВ, ток  $\sim 30$  кА, длительность  $\sim 7$  мкс, энергосодержание за импульс - 120 - 150 кДж).

На установке ГОЛ-3 пучок, после прохода плазменной части, и электронно-горячая плазма попадают на приёмный коллектор пучка и плазмы. Поверхностный

слой коллектора испаряется, часть газового облака ионизируется. Получившаяся углеродная плазма из области коллектора попадает в основной объём с горячей плазмой. Плотная, холодная углеродная плазма вызывает увеличение потерь энергии из основной плазмы. Очень много энергии тратится на ионизацию, нагрев и излучение.

Аналогичная проблема существует в больших диверторных токамаках. Во время большого срыва и во время ELM (Edge Localized Modes) на токамаках мощный

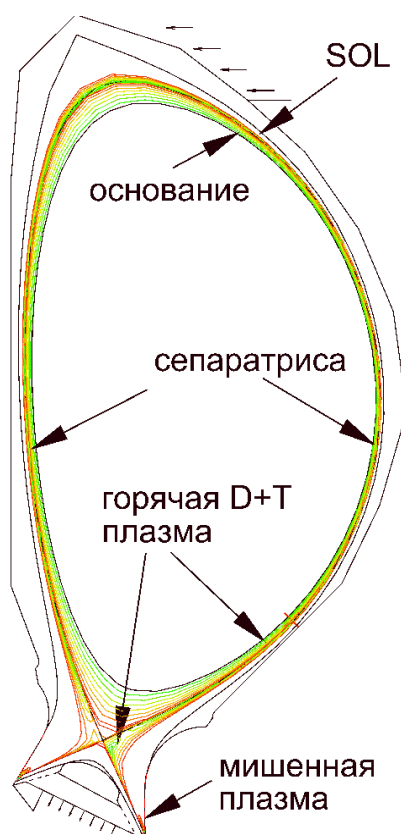


Рис. 2. Разрез плазменной камеры токамака ИТЭР

поток плазмы попадает на стенки камеры и диверторные пластины. Для токамака ИТЭР плотность энергии плазменного потока может достигать  $\sim 140$  МДж/м<sup>2</sup> для большого срыва и  $\sim 10$  МДж/м<sup>2</sup> для ELM-ов. При этом характерная энергия частиц (электронов и ионов) имеет величину 1 - 20 кэВ. Кроме того, во время срыва могут появляться убегающие электроны со средней энергией 15 МэВ и максимальной энергией до 150 МэВ, которые имеют плотность энергии до 30 МДж/м<sup>2</sup>. Попадание плазмы с указанными параметрами на материальные стенки приводит к их сильной эрозии и определяет время жизни соответствующих конструкций и, в конечном итоге, всего токамака. Взаимодействие мощного потока плазмы с поверхностью ведёт к интенсивному испарению материала и формированию защитного слоя пара и

плазмы вблизи поверхности. Плазменные ионы и низкоэнергетичные электроны более или менее полностью тормозятся в этом защитном слое. Их кинетическая энергия переходит в кинетическую энергию разлетающегося облака, в ионизацию и нагрев, а также в излучение. Тем самым уменьшается величина эрозии материалов. В тоже время величина эрозии определяется тем, насколько глубоко в материал проникает энергия плазмы, достаточная для разрушения. Это определяет существенное отличие механизма эрозии под действием быстрых электронов (с большим пробегом в веществе) от ионов и медленных электронов. На существующих токамаках плотности мощности плазмы, попадающей на мишень, на два порядка меньше, чем значение, принятое для ИТЭРа – около  $10 \text{ МВт/см}^2$ . Поэтому поведение материалов при воздействии на них мощных потоков плазмы возможно изучать лишь на специальных установках, параметры которых близки к параметрам плазмы в режиме большого срыва на ИТЭРе. Следует также учесть, что полномасштабная имитация большого срыва не возможна в силу отсутствия установок с адекватными параметрами. Поэтому используются различного типа установки для имитации различных процессов взаимодействия с мишенями. Наиболее продвинуты в этом отношении установки на основе плазменных пушек, которые позволяют имитировать воздействие плазменного потока с горячими ионами и сравнительно холодными электронами. Эти эксперименты позволяют моделировать физические параметры защитного слоя плазмы и МГД движения. Эрозия материала в такого рода экспериментах достаточно мала из-за заметного влияния экранирующего слоя испаренного вещества. В тоже время вклад быстрых электронов не может быть исследован на этих установках. Быстрые электроны, глубоко проникают внутрь материала и могут производить его взрывоподобное разрушение на большую глубину.

Целью данной работы на установке ГОЛ-3 служило изучение динамики поверхностной плазмы, возникающей при взаимодействии горячих электронов с мишенью. Для этого была создана фотографическая система с временным разрешением (до 1 мкс). Она состоит из (см. рис. 3) двух короткофокусных объективов, используемых для увеличения угла обзора, электронно-оптического преобразователя (ЭОП), используемого в качестве усилителя яркости и для временного экспонирования (от 1 до 5 мкс), и цифровой ПЗС-камеры. С помощью этой фотографической системы были сделаны снимки мишени и образующейся вокруг неё плотной плазмы в различные моменты времени после начала инъекции пучка. На этих снимках видно газовое облако, облако поверхностной плазмы

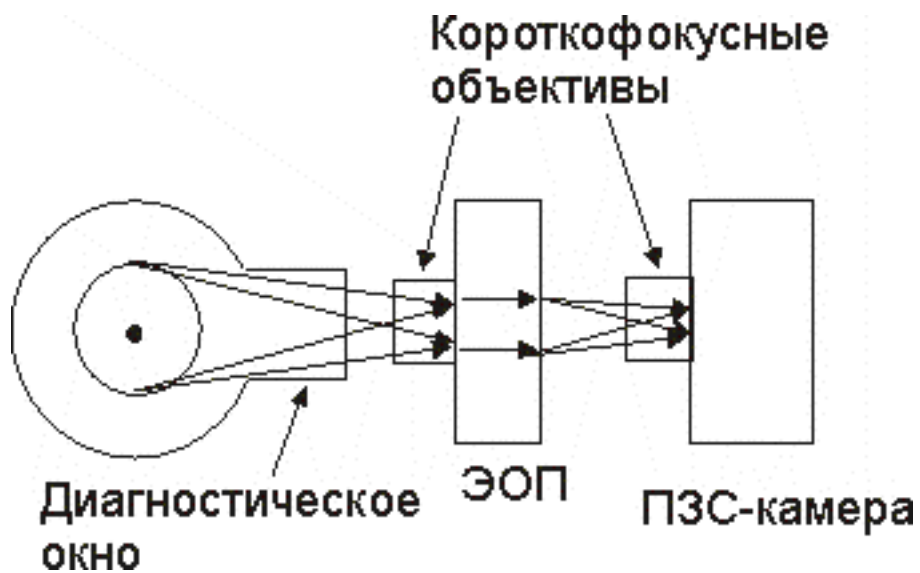


Рис. 3. Схема фотографической системы с временным разрешением

и центральную область, в которой находится мишень. Из этих снимков было оценено количество испарённых частиц, плотность плазмы вблизи мишени, глубина эрозии поверхности мишени, измерена мощность излучения плазмы в видимом диапазоне, средняя скорость расширения газового и плазменного облаков, а также температура поверхности мишени.

## Схема эксперимента

Схема эксперимента изображена на рисунках 3 и 4. Через инжектор, расположенный в диагностическом окне в промежутке между 59 и 60 катушками

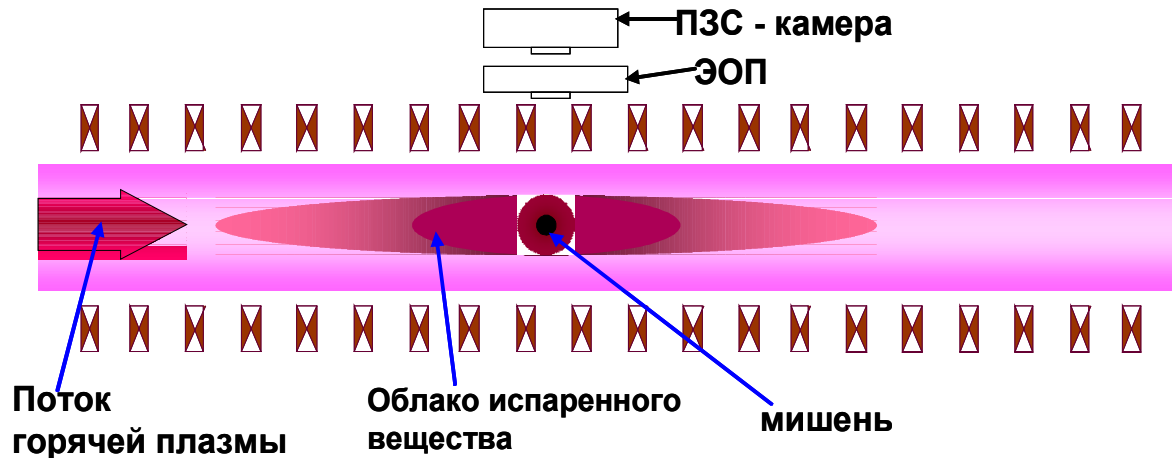


Рис. 4. Схема эксперимента, вид сверху

приблизительно в центре соленоида установки ГОЛ-3 (расстояние  $z$  от центра входной пробки, принятой за начало координат, равно 662 см), крупинка инжектируется в центр плазменной камеры. Так как время существования плазмы  $\sim 0.5$  мс, то крупинку можно инжектировать в нужную точку до начала разряда, исключая ее транспортировку сквозь горячую плазму (снижается необходимая начальная скорость инжекции, исключается испарение наружных слоев крупинки на периферии). Инжекция осуществляется снизу вверх, начальная скорость крупинки изменяется в диапазоне 10-25 м/с. В экспериментах использовали крупинки диаметром  $\sim 2$  мм. Длина пробега, электронов пучка, в графите составляет 1 мм, что составляет половину диаметра мишени. Там же, в диагностическом окне в промежутке между 59 и 60 катушками, сбоку располагается фотографическая система с временным разрешением.

Излучение собирается короткофокусным объективом, затем усиливается электронно-оптическим преобразователем ЭПМ-44Г и через второй короткофокусный объектив попадает на объектив цифровой камеры KODAK DC-20. Первый короткофокусный объектив позволяет увеличить угол обзора, через диагностическое окно диаметром 8 см видимая область составляет 11 см, на рисунке 3 схематически показан ход лучей. Второй - нужен для того чтобы фотоаппарат, имеющий свой собственный объектив, «видел» люминофор ЭОПа на расстоянии

позволяющем делать чёткие снимки. Электронно-оптический преобразователь также является временным затвором, который позволяет делать фотографии с выдержкой до 1 мкс. Выбор цифровой камеры KODAK DC-20 обусловлен несколькими её достоинствами: компактностью, высокой чувствительностью (эквивалент 800/1600 ISA), возможностью получения истинной измеренной яркости (отсутствует какое-либо сжатие, преобразование или кодировка сигнала внутри камеры). Приёмная светочувствительная матрица камеры имеет размерность 500×240 ячеек. Цифровая камера представляет данные в виде файла специального формата dc2, который содержит матрицу значений яркости в единицах напряжения АЦП фотоаппарата (от 0 до 255). Далее файл переносится на компьютер для обработки. Подробнее особенности работы комбинации ЭОП+DC-20 изложены в [1].

### ***Калибровка чувствительности ЭОП+DC-20***

Была проведена абсолютная калибровка чувствительности ЭОП+DC-20.

Калибровка проводилась с помощью лампы СИ-8. Схема приведена на рисунке 5. В качестве источника излучения на расстоянии  $L$  от ЭОПа поставлена ленточная вольфрамовая лампа СИ-8, между ними находился фильтр НС-10. Фильтр НС-10 поставили для моделирования условий эксперимента, т.к. он использовался для фотографирования мишени и образованной холодной плазмы. Лампа использовалась в качестве излучающего чёрного тела. Был получен снимок изображённый на рисунке 6. Расстояние  $L$  было таким же на котором располагалась фотографическая система от центра плазменной камеры, куда производилась инъекция мишени.

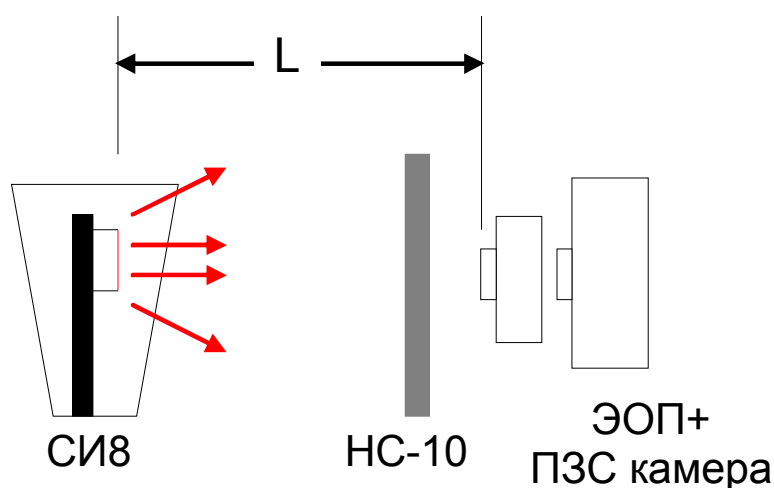


Рис. 5. Схема калибровки чувствительности фотографической системы с временным разрешением.



На рисунке 7, на левом графике изображена абсолютная пропускающая способность фильтра НС-10 в зависимости от длины волны, а на правом графике изображена абсолютная чувствительность фотокатода в зависимости от длины волны. На графике, изображённом на рисунке 8, изображены отнормированные - пропускающая способность фильтра (линия 1), чувствительность фотокатода (линия 2) и их произведение (линия 3).

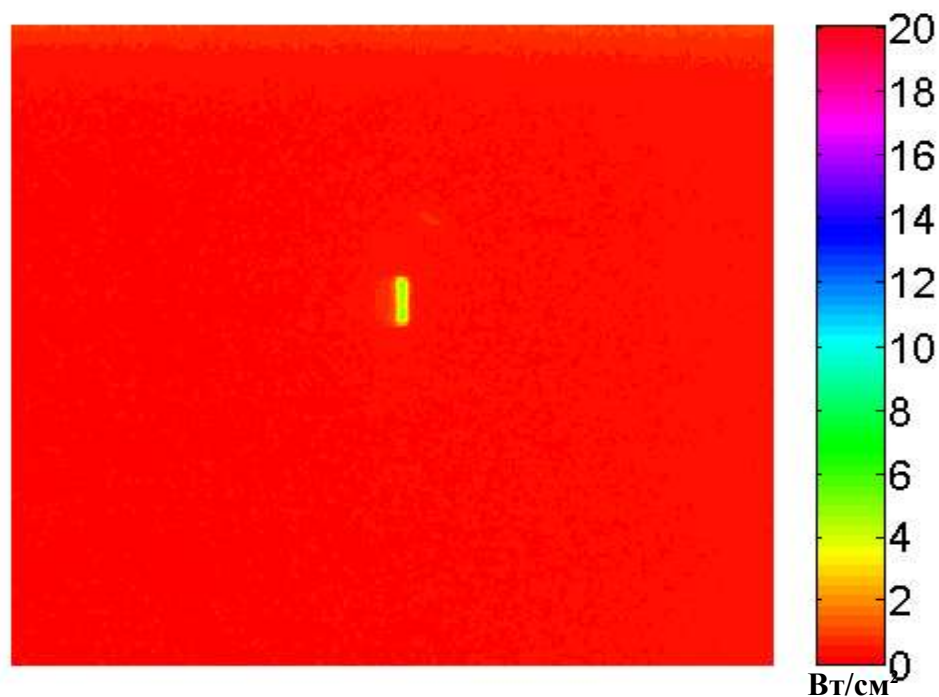


Рис. 6. Снимок лампы СИ-8 через фильтр НС-10.

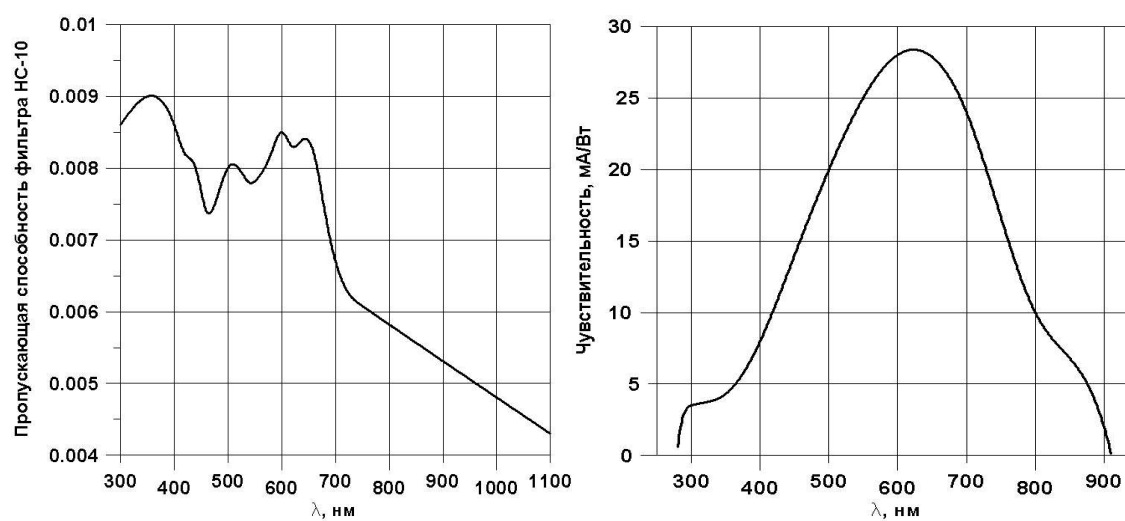


Рис. 7. Абсолютные - пропускающая способность фильтра НС-10 и абсолютная чувствительность фотокатода ЭОПа.

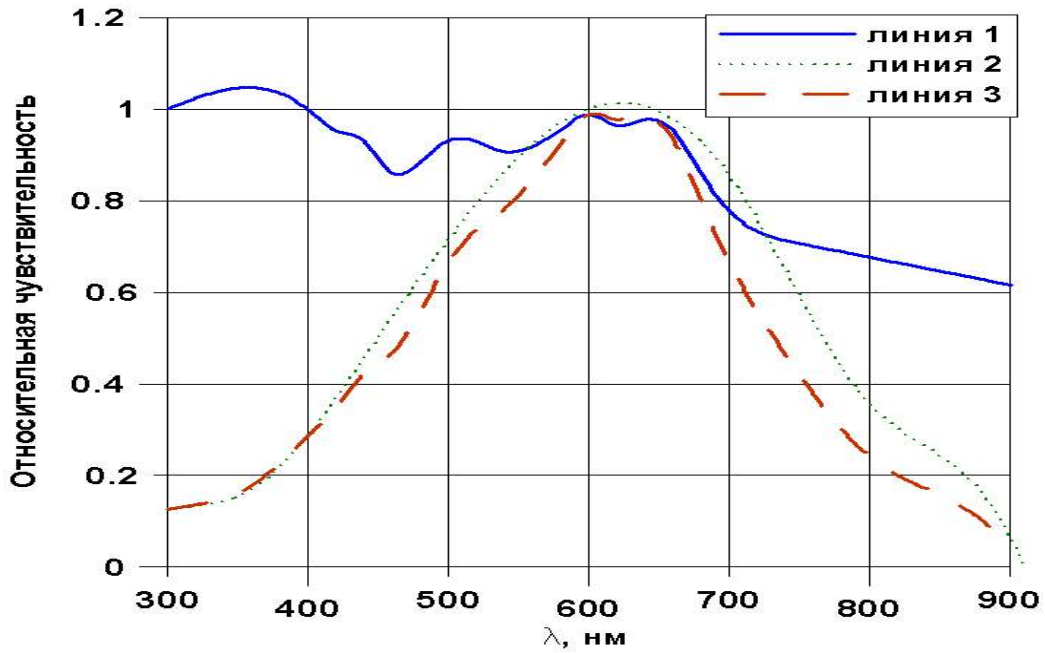


Рис. 8. Зависимость относительной чувствительности от длины волны. График 1 – относительная пропускающая способность фильтра НС-10, график 2 – относительная чувствительность фотокатода ЭОПа и график 3 – их произведение.

Зависимость температуры спирали от напряжения представлена на рисунке 9 (см. [6]). Из этого графика мы определили температуру спирали по подаваемому на нее напряжению. Напряжение лампы составляло  $U_{\text{лампы}} = 4.65 \text{ В}$ , что соответствует температуре  $T = 2150 \text{ }^\circ\text{С}$ .

С помощью полученных данных из калибровки мы смогли получить связь чувствительности АЦП фотографической системы с временным разрешением с мощностью излучения:

$$I = \int c_1 \lambda^{-5} \varepsilon_w(\lambda) \left( \exp\left(\frac{c_2}{\lambda T_w}\right) - 1 \right)^{-1} d\lambda = \frac{4.4}{30} \cdot U_{\text{АЦП}} \text{ [Вт/см}^2\text{]}, \quad (1)$$

где  $U_{\text{АЦП}}$  – это единицы напряжения АЦП фотоаппарата;

$c_1 = 3.74 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/см}^2$ ;

$c_2 = 1.44 \cdot 10^7 \text{ нм}\cdot\text{К}$ ;

$\varepsilon_w$  – спектральный коэффициент черноты,  $\varepsilon_w = 0.43$ ;

$T_w$  – температура спирали лампы СИ-8,  $T_w = 2420 \text{ К}$ ;

30 – это  $U_{\text{АЦП}}$  лампы на снимке;

4.4 – это мощность излучения лампы в диапазоне 300÷800 нм, это связано с тем что произведение чувствительности фотокатода и пропускающей способности фильтра

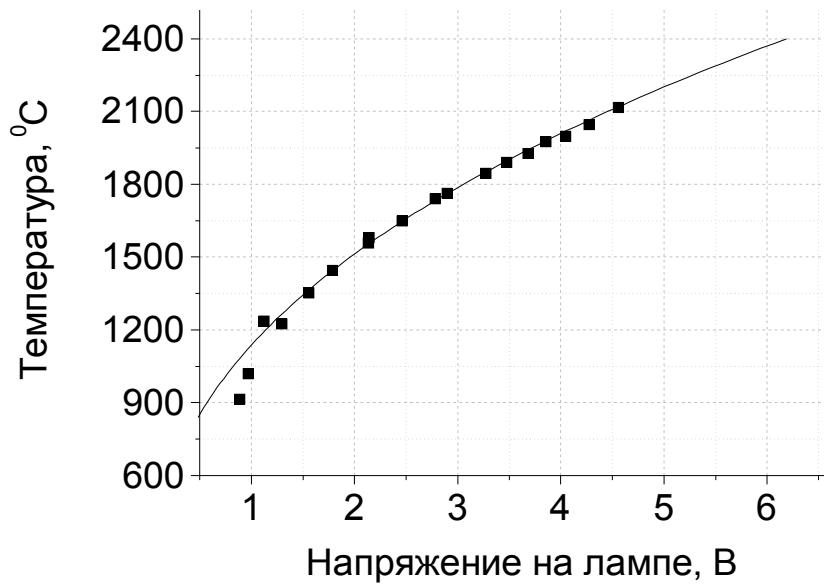


Рис. 9. Зависимость яркостной температуры спирали лампы СИ 8-200 от напряжения, точки – измерения с помощью оптического пирометра, линия – расчет

представляют собой не прямоугольник, а некоторую кривую (линия 3 на рис. 8) и поэтому разные линии имеют разный статистический вес. Поэтому при вычислении мощности лампы в диапазоне 300÷900 нм мы посчитали её только до 800 нм.

## Обработка экспериментальных данных

### Определение температуры поверхности мишени

С помощью произведённой калибровки по отношению интенсивностей свечения поверхности и лампы определим температуру поверхности мишени.

Мощность, излучаемая источником теплового излучения [2], равна:

$$I = \int c_1 \lambda^{-5} \left( \exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right)^{-1} d\lambda \quad [\text{Вт/см}^2], \quad (2)$$

где:  $c_1 = 3.74 \cdot 10^{-20}$  Вт/см<sup>2</sup>;

$c_2 = 1.44 \cdot 10^7$  нм·К.

Отношение амплитуды сигналов на изображениях связано с температурами мишени и спирали лампы соотношением (3)

$$\frac{A_C}{A_W} = \frac{\int Dc_i(\lambda) \lambda^{-5} \varepsilon_C(\lambda) \left( \exp\left(\frac{c_2}{\lambda T_C}\right) - 1 \right)^{-1} d\lambda \cdot \tau_C}{\int Dc_i(\lambda) F(\lambda) \lambda^{-5} \varepsilon_W(\lambda) \left( \exp\left(\frac{c_2}{\lambda T_W}\right) - 1 \right)^{-1} d\lambda \cdot \tau_W}, \quad (3)$$

где:  $A_W, A_C$  – интенсивности на фотографиях вольфрамовой спирали и мишени;

$\varepsilon_W, \varepsilon_C$  – спектральные коэффициенты черноты,  $\varepsilon_W = 0.43$  и  $\varepsilon_C = 0.89$ ;

$Dc_i(\lambda)$  – чувствительность данной цветовой плоскости фотокатода ЭОПа;

$F(\lambda)$  – коэффициент пропускания фильтра;

$\tau_W, \tau_C$  – эффективная длительность экспозиции,  $\tau_W = \tau_C = 5$  мкс;

$T_W$  – температура спирали лампы СИ-8,  $T_W = 2420$  К.

На рисунке 10 представлена зависимость отношения  $A_C/A_W$  от температуры мишени  $T_C$ .

$U_{АЦП}$  на снимках с мишенью было ослаблено в 7 раз (диагностическое окно было покрыто графитом и ослабляло излучение в 7 раз), то есть для этих снимков получается следующая формула, см.(1) :

$$I = \frac{30.8}{30} \cdot U_{АЦП} \quad [\text{Вт/см}^2]. \quad (4)$$

Излучение которое мы наблюдаем в центре рисунка 11, складывается из излучения мишени, газа и мишенной плазмы. Пусть мишень закрывает половину

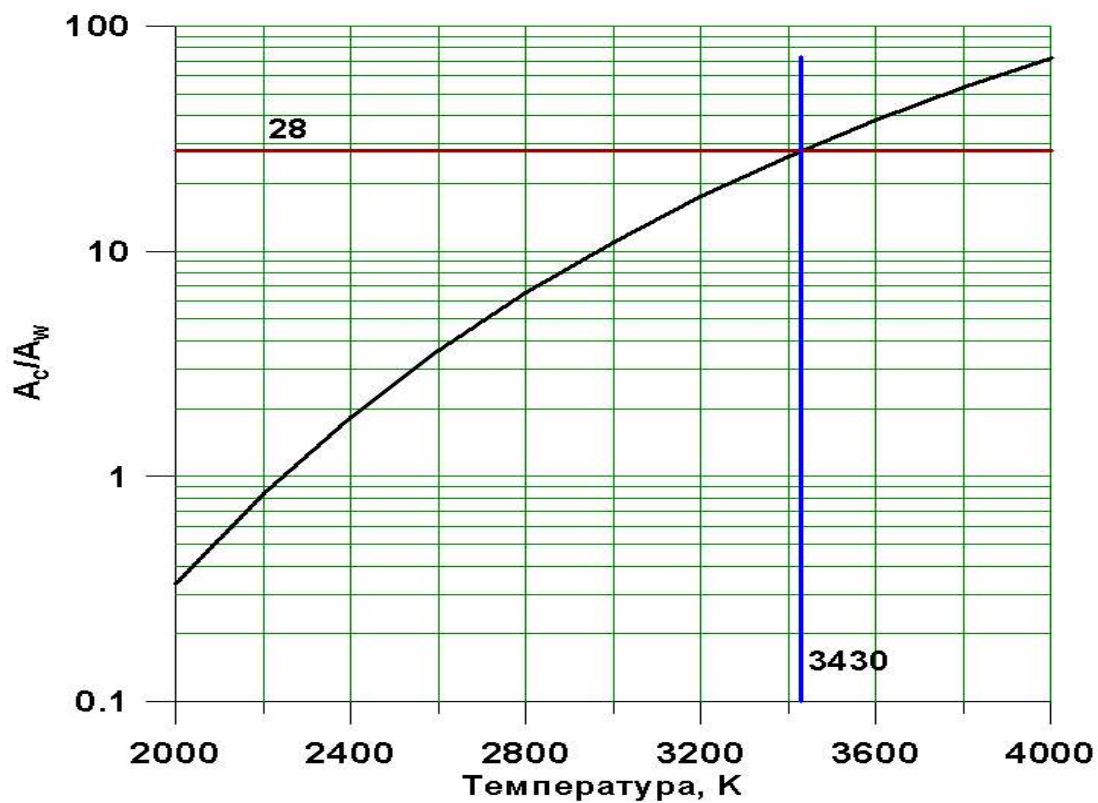


Рис. 10. Зависимость  $A_c/A_w$  от температуры  $T$ .

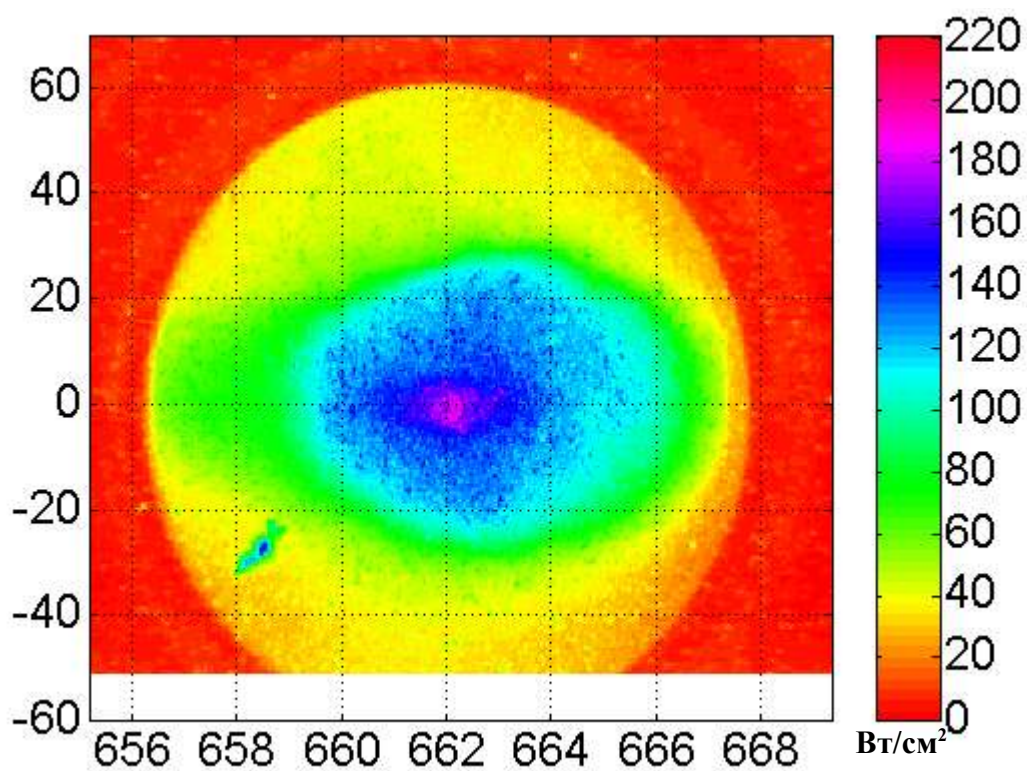


Рис. 11. Выстрел PL6424, плазма с мишенью.

излучения, которое наблюдаем из центра. Тогда для того, чтобы вычислить мощность излучения поверхности мишени от излучения в центре ( $200 \text{ Вт/см}^2$ ) отнимем половину излучения приповерхностной области ( $157/2 \text{ Вт/см}^2$ ). Получаем мощность излучения поверхности мишени  $I = (122 \pm 9) \text{ Вт/см}^2$  (из рис. 11).

Посчитав отношение  $A_c/A_w = 122/4.4 = 28 \pm 7$ , из графика на рис. 10 получаем  $T_c = 3430(\pm 150) \text{ К}$

При вычислении температуры поверхности мишени мы использовали предположение, что плазма вблизи поверхности мишени оптически прозрачна (т.е. излучение не заперто). Докажем это предположение. Пусть вся мощность излучения лежит в одной линии. Оценим длину свободного пробега фотона для этой линии по формуле (см. [5]):

$$l = \frac{L}{\tau}, \quad (5)$$

где  $\tau$  -

$$\tau = r_0 \cdot f_{mn} \cdot \lambda \cdot \left( \frac{\pi \cdot \lambda^2}{\delta \lambda^2} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot N \cdot L, \quad (6)$$

отсюда получаем конечную формулу (7) для оценки длины свободного пробега -

$$l = \frac{\delta \lambda}{\lambda^2 \cdot r_0 \cdot f_{mn} \cdot N \cdot \sqrt{\pi}}, \quad (7)$$

где:  $\lambda$  - это длина волны, в данной оценке  $\lambda \approx 550 \text{ нм}$  (средняя длина волны в видимой области);

$\delta \lambda$  - это ширина на полувысоте,  $\delta \lambda \approx 0.4 \text{ нм}$  (см. [4]);

$r_0 = 2.8179 \cdot 10^{-13} \text{ см}$  - классический радиус электрона;

$f_{mn}$  - это сила осциллятора, для спектральных линий видимого диапазона меньше 1, примем  $f_{mn} = 1$ ;

$N$  - заселённость нижнего уровня.

Заселённость нижнего и верхнего уровней связаны формулой (8):

$$\frac{N^*}{N} = \frac{g^*}{g} \cdot \exp\left(-\frac{\Delta E}{T}\right), \quad (8)$$

где:  $\Delta E$  - это энергия перехода между уровнями, в данной оценке  $\Delta E \approx 2 \text{ эВ}$ ;  $T$  - это температура слабо ионизованной плазмы, в данной оценке  $T = 1 \text{ эВ}$ . Заселённость верхнего уровня связана с мощностью излучения соотношением (9):

$$P = N^* \cdot h\nu \cdot A, \quad (9)$$

где:  $N^*$  - это заселённость верхнего уровня;

$h\nu$  – это энергия перехода между уровнями;

$A$  – коэффициент Эйнштейна.

Из формул (8) и (9) получаем формулу (10) связывающую заселённость нижнего уровня и мощность излучения –

$$N = N^* \cdot \exp\left(\frac{\Delta E}{T}\right) = \frac{P}{\Delta E \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \cdot A} \cdot \exp\left(\frac{\Delta E}{T}\right), \quad (10)$$

где:  $P$  – мощность излучения, для оценки возьмём  $P = 30$  Вт/см<sup>3</sup> (см. Рис.11);

$A$  – коэффициент Эйнштейна, для элементов излучающих на установке ГОЛ-3 –  $O$ ,  $C$ ,  $Li$ ,  $D$  и др. величина  $A > 10^8$  с<sup>-1</sup>. Примем  $A = 10^8$  с<sup>-1</sup>;

Отсюда получаем заселённость нижнего уровня  $N \approx 4 \cdot 10^{12}$  см<sup>-3</sup>.

Из формулы (7) получаем, что  $l \approx 4$  см, диаметр плазмы, из которой мы смотрим излучение, порядка 4 см. При вычислении длины свободного пробега фотона мы предположили, что вся плазма излучает в одной линии. Но это не так. Спектральных линий гораздо больше. То есть, для каждой длины волны мы получаем меньшее количество атомов на нижнем уровне и, как следствие, длина свободного пробега фотона будет существенно больше 4 см. Это означает, что уже для 10 линий мы получим для каждой линии длину свободного пробега фотона  $\sim 40$  см. Так что даже при ошибке в два раза, всё равно пробег фотона будет гораздо больше размера плазмы, из которой мы смотрим излучение. Следовательно, плазма вблизи поверхности мишени является оптически прозрачной, и полученная температура поверхности мишени рассчитана правильно.

### ***Определение линейной плотности плазмы по интенсивности свечения***

При вычислении линейной плотности плазмы использовали, что интенсивность свечения пропорциональна плотности частиц [4].

По снимкам на рисунках 12 и 13 оценим линейную плотность поверхностной плазмы. По известной линейной плотности плазмы  $nl_0 = (2.7 \pm 0.3) \cdot 10^{15}$  см<sup>-2</sup>, определённой с помощью интерферометра, расположенного на  $z = 845$  см (на расстоянии 183 см) и по формуле :

$$nl \approx nl_0 \cdot \frac{I}{I_0}, \quad (11)$$

где:  $I$  - мощность излучения плазмы с мишенью,  $I_0 \approx 0.25$  Вт/см<sup>2</sup> (см.рис. 12) - мощность излучения плазмы без мишени при  $nl_0 = 2.7 \cdot 10^{15}$  см<sup>-2</sup>, определим линейную плотность плазмы на расстоянии  $\sim 3$  см от мишени в момент времени 10 мкс. В этой области  $I = 120$  Вт/см<sup>2</sup>, отсюда, из формулы (11) получаем -  $nl \approx 1.3 \cdot 10^{18}$  см<sup>-2</sup>.

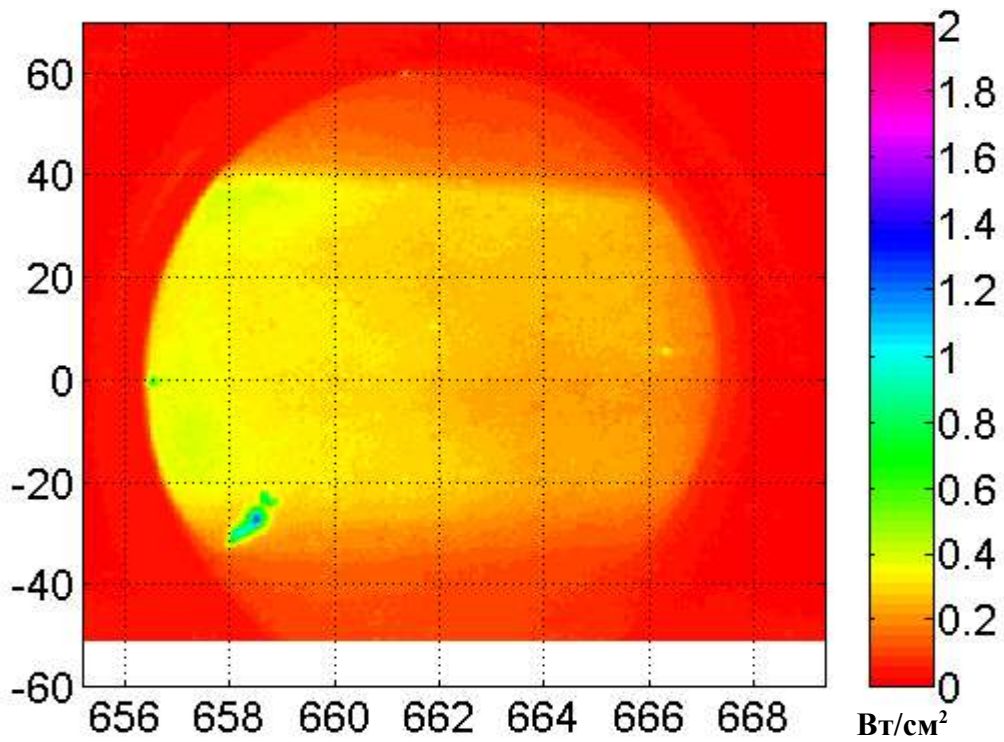


Рис.12. Выстрел PL6431, плазма без мишени.

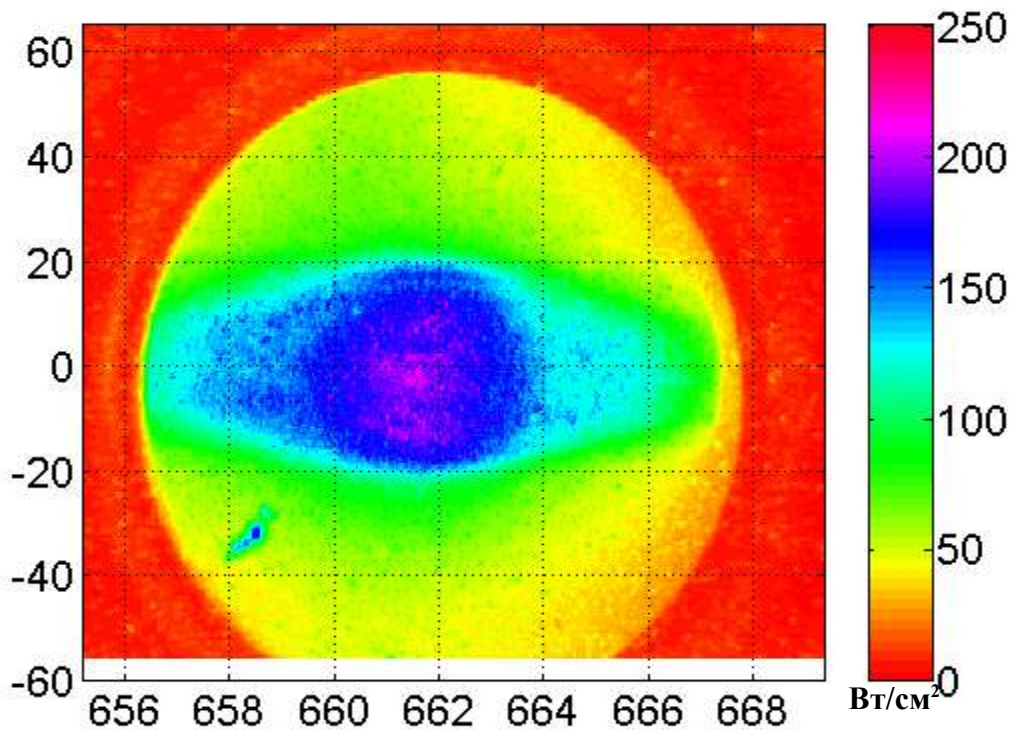


Рис. 13 Выстрел PL6425, плазма с мишенью.

***Скорость разлёта облака плазмы***



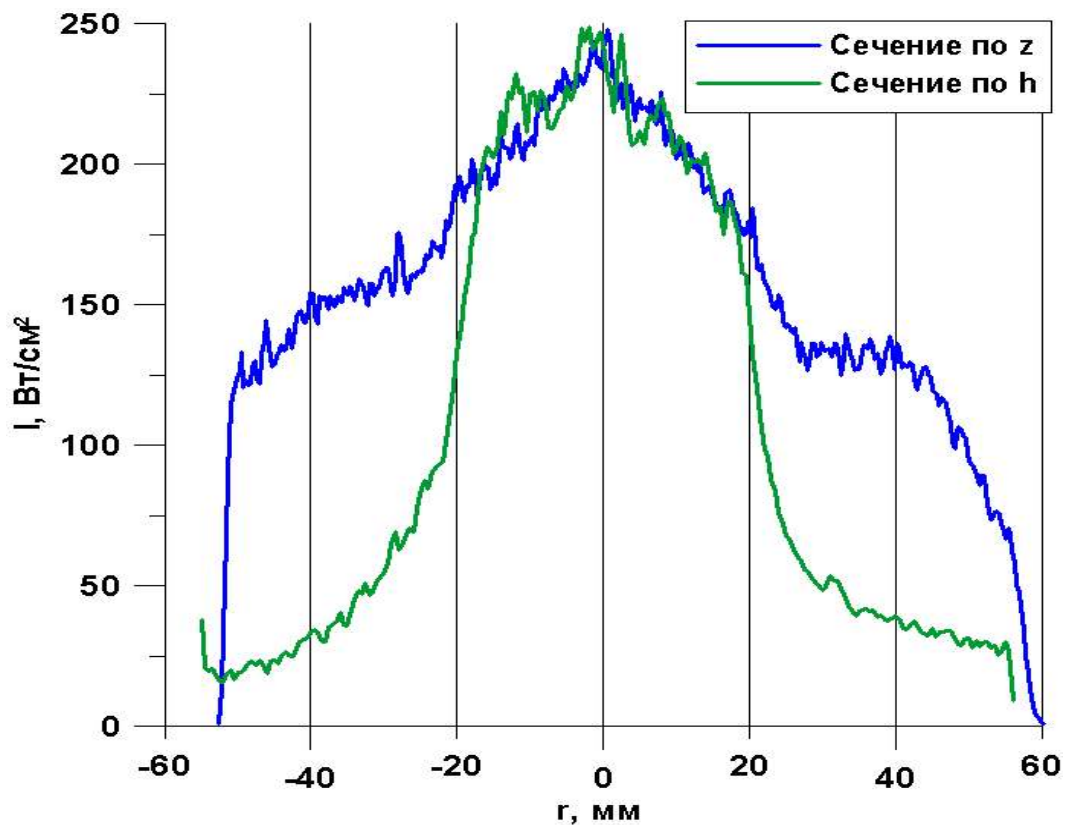


Рис. 14 Сечение по длине и по высоте плазменного шнура, в 0 мм – находится крупинка. Сечения сделаны по снимку PL6425.

На рисунке 14 чётко видны границы различных областей. Размеры газового облака определяются по сферическому облаку в центре снимка. Почему мы считаем это облако газовым – облако имеет практически сферическую форму (различия по  $z$  и  $h$  составляют около 15%), значит оно практически не замагничено (состоит из электрически нейтральных частиц).

По размерам облака можно вычислить среднюю скорость его разлёта ( $V = R/t = (2 \pm 0.1 \text{ см}) / (10 \pm 5 \text{ мкс}) = (2 \pm 1) \cdot 10^5 \text{ см/с}$ ). Также из снимка можно вычислить скорость разлёта замагниченной плазмы вблизи мишени. Так как края плазменного облака на снимке не видно то для того, чтобы определить размер облака вдоль  $z$  предположили, что оно имеет треугольный вид и нашли место где находится его край,  $L = 10 \text{ см}$ .  $V = L/t = (10 \pm 2 \text{ см}) / (10 \pm 5 \text{ мкс}) = (1 \pm 0.5) \cdot 10^6 \text{ см/с}$  (что соответствует энергии  $E \sim 13 \text{ эВ}$ ).

### ***Определение полного количества испарившихся частиц***

Для определения полного количества частиц, а также глубины эрозии проинтегрируем плотность углеродной плазмы и газа по всему объёму

$$N_{\text{част}} = \int_V n(r) d^3 r. \quad (12)$$

Так как точное распределение  $n(r)$  не известно, то для определения полного количества испарившихся частиц воспользуемся линейной плотностью плазмы определённой ранее по формуле (11) и расписав  $d^3 r$  как  $dx \cdot dy \cdot dz$  ( $nl = \int n dx$ ). В результате получаем формулу:

$$N_{\text{част}} = \frac{I}{I_0} \cdot nl_0 \cdot dz \cdot dy, \quad (13)$$

где  $I$  – это интеграл интенсивности,  $I = 2.8234 \cdot 10^6$  Вт/см<sup>2</sup>, вычислили из снимка изображённого на рис. 13;

$dz, dy$  – это размер столбцов и строк матрицы,  $dz = 0.0304$  см,  $dy = 0.0491$  см;

$nl_0$  – линейная плотность плазмы без мишени,  $nl_0 = 2.7 \cdot 10^{15}$ ;

$I_0$  – интенсивность излучения плазмы без мишени,  $I_0 \approx 0.25$  Вт/см<sup>2</sup>, из рис. 12.

По интенсивности свечения посчитаем полное количество частиц испарившихся с поверхности частиц  $N_{\text{част}} \sim 4 \cdot 10^{19}$  штук.

Из полного количества испарившихся частиц можно оценить глубину эрозии, из формулы:

$$m = \rho \cdot V, \quad (14)$$

так как взаимодействие поверхности с налетающими горячими электронами пучка и плазмы происходит, в основном, с одной стороны, то заменим шар диаметром  $d \sim 1.8$  мм диском с эффективным диаметром  $d \sim 1.8$  мм

$$N_{\text{част}} = \frac{m}{\mu \cdot m_u}, \quad (15)$$

а

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot h. \quad (16)$$

Подставив формулы (15) и (16) в формулу (14) получаем -

$$h = \frac{N_{\text{част}} \cdot \mu \cdot m_u}{\rho \cdot \pi \cdot r^2}, \quad (17)$$

где  $N_{\text{част}}$  - количество испарившихся частиц, в нашем случае  $N_{\text{част}} \sim 4 \cdot 10^{19}$ ,

$\mu$  – молярная масса испарившегося вещества,  $\mu = 12$  а.е.м.(графит),

$m_u = 1.66 \cdot 10^{-24}$  гр – атомная единица массы

$\rho$  – плотность испарившегося вещества,  $\rho = 1.8$  гр/см<sup>3</sup>,

$r$  – эффективный радиус диска,  $r = 0.09$  см.

Из формулы (17) получаем глубину эрозии -  $h \sim 200$  мкм.

## Заключение

Создана фотографическая система с временным разрешением для изучения поверхностной плазмы, образующейся при воздействии электронного релятивистского пучка и горячей плазмы на мишень. Показано, что в результате такого воздействия поверхность мишени испаряется. Часть испарившегося вещества сферически разлетается в виде газа и пыли, часть ионизуется и движется вдоль силовых линий магнитного поля. Из фотографий получены следующие результаты:

1. Поверхность мишени разогревается до температуры  $T = 3400(\pm 150)$  К.
2. Мощность излучения плазмы в видимом диапазоне  $0.25$  Вт/см<sup>2</sup>, поверхностной плазмы вблизи мишени  $120$  Вт/см<sup>2</sup>.
3. Линейная плотность плазмы вблизи мишени составляет  $n_l \sim 1.3 \cdot 10^{18}$  см<sup>-2</sup>.
4. Газовое облако расширяется со средней скоростью  $V = (2 \pm 1) \cdot 10^5$  см/с.
5. Замагниченная мишенная плазма расширяется вдоль магнитного поля со скоростью  $V = (1 \pm 0.5) \cdot 10^6$  см/с ( $E \sim 13$  эВ).
6. Полное количество испарившихся частиц  $N \sim 4 \cdot 10^{19}$  штук, что соответствует глубине эрозии  $\sim 200$  мкм.

## Литература

- [1] Спектрометр вакуумного ультрафиолетового излучения с цифровой регистрацией. Бурдаков А.В., Заболотский А.Ю., Князев Б.А., Койдан В.С., Поступаев В.В., "Приборы и техника №6", 2000.
- [2] Излучательные свойства твердых материалов, под ред. Шейндлина
- [3] I.A. Ivanov, A.V. Arzhannikov, V.T. Astrelin, A.V. Burdakov, V.S. Koidan, K.I. Mekler, S.V. Polosatkin, V.V. Postupaev, A.F. Rovenskikh, and S.L. Sinitsky. Spectroscopy measurements of hot plasma temperature on the multimirror trap GOL-3. // Transactions of fusion science and technology, Vol.47, No.1T, 2005, p.171-174.
- [4] V.T. Astrelin, A.V. Burdakov, P.Z. Chebotaev, V.V. Filippov, V.S. Koidan, K.I. Mekler, P.I. Melnikov, V.V. Postupaev, A.F. Rovenskikh, M.A. Shcheglov, H. Wuerz. Hot electron target interaction experiments at the GOL-3 facilit. // Nuclear Fusion, Vol. 37, No.11, 1997, p.1541-1558.
- [5] J.D. Huba. NRL plasma formulary.
- [6] Заболоцкий А.Ю., Изучение пространственных характеристик излучения горячей плазмы на установке ГОЛ-3-II. / Магистерский диплом, 1999