

04:07:12

©1994 г.

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ЭВОЛЮЦИЯ СВЕЧЕНИЯ ПЛАЗМЫ ТОКОВОГО СЛОЯ В РАЗЛИЧНЫХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЯХ

*С.Ю.Богданов, Ю.Ф.Бондарь, В.Б.Бурилина, Н.П.Курый, В.С.Марков,
Г.П.Мхеидзе, А.А.Савин, А.Г.Франк*

Институт общей физики, 117942, Москва
(Поступило в Редакцию 26 ноября 1993 г.)

Электронно-оптический преобразователь в комбинации с узкополосными интерференционными фильтрами был использован для исследования пространственно-временной эволюции собственного свечения плазмы токового слоя. Получены двумерные распределения яркости различных спектральных линий в последовательные моменты времени. Продемонстрированы высокая информативность и наглядность метода диагностики, основанного на анализе изображений плазменного объекта в свете различных спектральных линий.

Введение

Высокая информативность различных методов диагностики плазмы, основанных на анализе ее собственного излучения, общеизвестна и не нуждается в дополнительном обосновании. Эти методы можно условно разделить на две большие группы, каждой из которых присущи как достоинства, так и недостатки. К первой группе можно отнести различные фотографические методы, позволяющие зарегистрировать изображение плазменного объекта. Эти методы отличаются высокой наглядностью, однако получаемая с их помощью информация носит, как правило, чисто качественный характер. Ко второй группе можно отнести спектроскопические методы диагностики плазмы, позволяющие получить количественные данные о различных параметрах плазмы. В отличие от фотографических методов достигнуть хорошего пространственного разрешения этими методами весьма трудно, а в ряде случаев даже невозможно.

В настоящей работе описывается методика получения изображения плазменного объекта в свете различных спектральных линий, в которой до некоторой степени совмещаются достоинства фотографических и спектроскопических методов диагностики плазмы. Узкополосные интерференционные фильтры использовались в комбинации с

электронно-оптическим преобразователем (ЭОП) в режиме регистрации изображения. Данная методика была применена для исследования пространственно-временной эволюции свечения плазмы плоского токового слоя, что позволило впервые зарегистрировать двумерные распределения интенсивности собственного излучения плазмы токового слоя в различных спектральных линиях в последовательные моменты времени.

Экспериментальная установка

Подобно нашим предыдущим исследованиям [1], формирование токового слоя осуществлялось в квазистационарном двумерном магнитном поле с нулевой линией. Эксперименты проводились на установке ТС-3Д, предназначенной для исследования формирования токовых слоев в трехмерных магнитных конфигурациях [3], однако система создания продольного магнитного поля в данных экспериментах не использовалась.

Нулевая линия квадрупольного магнитного поля совмещалась с осью ($r = 0$) цилиндрической кварцевой вакуумной камеры диаметром 18 см (рис. 1). Напряженность магнитного поля пропорциональна расстоянию до нулевой линии, $|B| = h_0|r|$, начальный градиент поля в описываемых экспериментах составлял $h_0 = 0.52$ кГс/см.

Начальная плазма в магнитном поле создавалась при пробое нейтрального газа электрическим полем θ -разряда. Рабочим газом служил гелий при давлении 300 мТор, что более чем в 5 раз превышало начальное давление газа в наших предшествующих экспериментах. Остаточное давление воздуха составляло 24 мТор.

С обоих торцов в камеру введены сетчатые электроды, расстояние между ними $l_z = 60$ см. К межэлектродному промежутку прикладывалось импульсное напряжение $U_z \approx 15$ кВ, в результате в плазме возбуждался электрический ток, который на определенном этапе приобретал форму плоского слоя. К моменту $t = 2.4$ мкс ток достигал максимального значения $I_z^{\max} = 45-55$ кА.

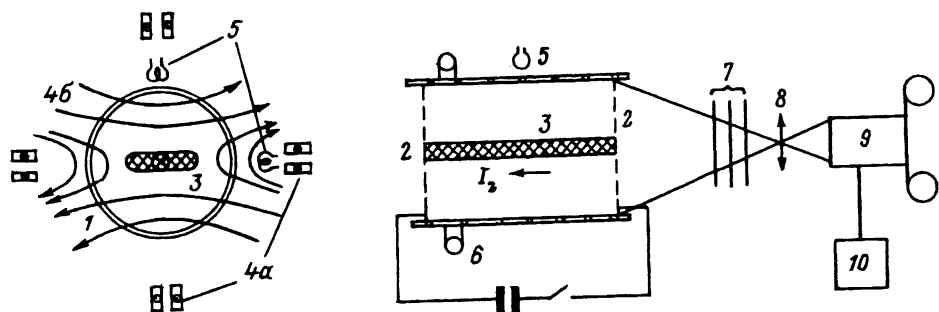


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

1 — кварцевая вакуумная камера $\varnothing 18$ см и длиной 100 см; 2 — электроды, введенные внутрь вакуумной камеры, расстояние между электродами 60 см; 3 — токовый слой; 4а — проводники с током для создания квазистационарного двумерного квадрупольного магнитного поля с нулевой линией, расположенной на оси вакуумной камеры; 4б — силовые линии магнитного поля; 5 — магнитные зонды для регистрации B_φ -компоненты магнитного поля тока плазмы; 6 — пояс Роговского, регистрирующий полный ток разряда; 7 — оптические фильтры; 8 — объектив; 9 — ЭОП с фотоприставкой; 10 — генератор высоковольтных импульсов для питания ЭОП.

Для получения двумерных распределений свечения плазмы токового слоя в различных спектральных интервалах и в различные моменты времени был использован электронно-оптический преобразователь (ЭОП) в режиме регистрации изображения в комбинации с набором узкополосных интерференционных фильтров. Схема экспериментальной установки и оптическая схема регистрации показаны на рис. 1. Изображение излучающего объекта — плазмы токового слоя переносилось на фотокатод ЭОП 9 с помощью объектива 8. Перед объективом помещались светофильтры 7 двух типов: узкополосные интерференционные фильтры и стандартные фильтры из цветного стекла, в том числе нейтральные.

В описываемых экспериментах использовался ЭОП типа "Бук" с МКП в качестве усилителя яркости. В спектральном диапазоне 380–880 нм чувствительность фотокатода ЭОП составляет 250 мкА/лм. При анодном напряжении 15 кВ ЭОП обеспечивает усиление светового потока приблизительно в 400 раз. Диаметр рабочего поля экрана 25 мм и разрешающая способность 40 линий/мм позволяют получить достаточно четкое изображение объекта. В качестве источника импульсного напряжения для питания ЭОП использовался генератор [4], основным элементом которого является двойная формирующая линия с волновым сопротивлением $\rho = 25$ Ом. Коммутация формирующей линии осуществляется разрядником типа РУ-62; время экспозиции ЭОП определяется длительностью импульса, формируемого линией, и зависит от ее длины. В данной работе длительность экспозиции составляла 80 нс, время нарастания импульса ≈ 2 нс, спада ≈ 5 нс, амплитуда 15 кВ.

Регистрация изображения с экрана ЭОП осуществлялась фотографическим способом — либо фотоаппаратом, либо с помощью специальной контактной фотоприставки, которая обеспечивала более чем 10-кратный выигрыш в чувствительности.

В описываемых экспериментах использовались узкополосные интерференционные фильтры, максимум пропускания которых соответствовал характерным спектральным линиям основного газа: HeI 587.6 нм, HeII 468.6 нм и иона примеси CIII 569.6 нм; спектральные характеристики фильтров, определенные экспериментально, приведены в таблице (τ_{\max} — максимальное значение коэффициента пропускания, $\delta\lambda_{1/2}$ и $\delta\lambda_{1/10}$ — спектральные ширины полосы пропускания по уровням $0.5\tau_{\max}$ и $0.1\tau_{\max}$ соответственно). Как видно из таблицы, спектральные ширины полосы пропускания фильтров составляют $\delta\lambda_{1/2} = 1-1.7$ нм и $\delta\lambda_{1/10} = 2.75-4.5$ нм.

Спектральные характеристики интерференционных фильтров

	Спектральная линия	$\lambda(\tau_{\max})$, нм	τ_{\max} , %	$\delta\lambda_{1/2}$, нм	$\delta\lambda_{1/10}$, нм
HeI	587.6 нм	587.6	40	1.10	2.75
HeII	468.6 нм	469.4	43	1.13	3.00
CIII	569.6 нм	569.8	35	1.75	4.50

Поскольку давление остаточного газа составляло порядка 8% от давления основного газа (гелия), то следует ожидать присутствия в разряде заметного количества примесных ионов (азот, кислород), интенсивные линии излучения которых могут попадать в полосу пропускания фильтров. Для определения спектрального состава излучения, проходящего через фильтры, спектры излучения плазмы в окрестности максимумов пропускания использованных интерференционных фильтров были исследованы с помощью монохроматора МДР-3 (обратная линейная дисперсия 1.3 нм/мм). Как оказалось, в спектральных интервалах 583–593 и 464–474 нм заметной интенсивностью обладают только спектральные линии нейтрального гелия HeI 587.6 нм и иона гелия HeII 468.6 нм. Спектральный состав излучения плазмы в районе 570 нм оказался существенно более сложным: наряду с излучением иона углерода CIII ($\lambda = 569.6$ нм), в этом диапазоне зарегистрировано гораздо более интенсивное излучение, принадлежащее различным спектральным линиям однократно ионизированного азота NII ($\lambda = 567.6, 568.0$ и 568.6 нм). Излучение линии NII 568 нм было приблизительно в 12 раз более интенсивным, чем иона углерода CIII, тогда как подавление линии NII интерференционным фильтром оказалось недоста-

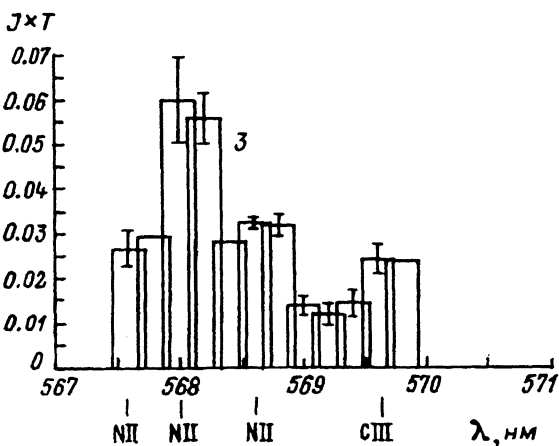
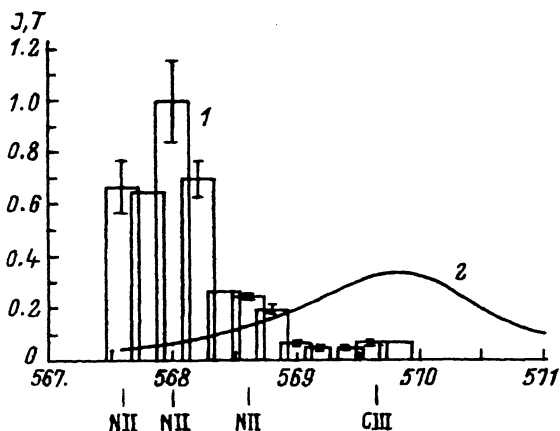


Рис. 2.

1 — спектр излучения плазмы в окрестности линии иона углерода CIII 569.6 нм; 2 — кривая пропускания интерференционного фильтра; 3 — спектр излучения, прошедшего через интерференционный фильтр. Кривая 3 представляет собой произведение кривых 1 и 2. Ширина ступеней гистограмм соответствует спектральному разрешению и составляет 0.25 нм. Отмечены длины волн спектральных линий ионов азота NII (567.6, 568.0, 568.6 нм) и углерода CIII (569.6 нм).

точным и лишь в 5 раз превышало ослабление линии СШ. Как видно из рис. 2, суммарная интенсивность излучения в линиях NII настолько велика, что даже после прохождения через интерференционный фильтр их вклад в формирование изображения в указанном спектральном диапазоне превышал 75%.

Таким образом, представленные в настоящей работе двумерные изображения отражают пространственно-временную эволюцию интенсивности излучения спектральных линий нейтрального гелия HeI, иона гелия HeII и иона азота NII в плазме токового слоя.

Одновременно с регистрацией собственного излучения плазмы проводились измерения полного тока плазмы и магнитного поля в двух точках снаружи вакуумной камеры, у ее стенки. На основании магнитных измерений определялась ширина токового слоя, т.е. больший из двух характерных размеров поперечного сечения слоя (рис. 3).

Полный ток плазмы I_z измерялся поясом Роговского с интегрированием на LR-цепочке (постоянная времени 35 мкс). Два магнитных зонда, помещенных вне вакуумной камеры ($R = 9.3$ см; $\varphi_1 = 0$ и $\varphi_2 = \pi/2$) (рис. 1), регистрировали производную по времени φ -компоненты магнитного поля тока плазмы. С помощью двух АПП Ф4226 сигналы, пропорциональные $\partial B_\varphi(t)/\partial t$, записывались в память ЭВМ "Правец-16". Последующая обработка включала интегрирование сигналов, т.е. получение величин $B_\varphi(t)$, а также определение их разностных и суммарных значений для каждого момента времени; на основании этих данных

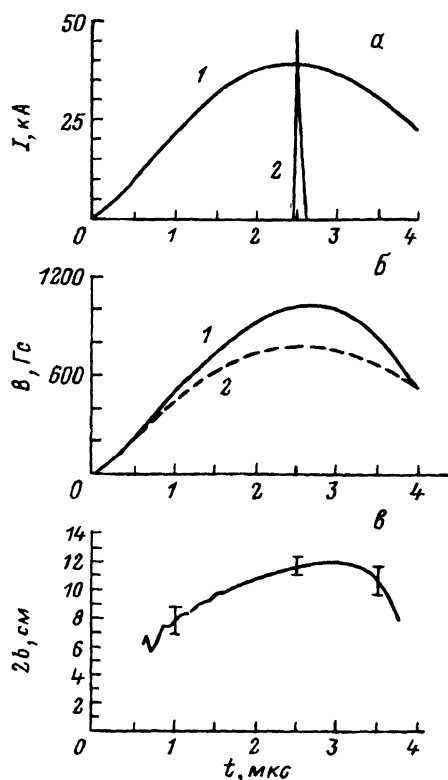


Рис. 3. Зависимости от времени полного тока разряда, измеряемого поясом Роговского (1), и реперный импульс, передний фронт которого совпадает с моментом подачи высоковольтного импульса длительностью 80 нс на ЭОП (2) (μ), магнитного поля токового слоя вне вакуумной камеры на расстоянии $r = 9.3$ см от нулевой линии под углами 0 (1) и $\pi/2$ (2) к поверхности токового слоя (б), ширины токового слоя, вычисленной на основании кривых б в предположении о равномерном распределении плотности тока по ширине слоя (в).

вычислялась ширина токового слоя $2b(t)$. При этом использовались априорные предположения о характере распределения поверхностной плотности электрического тока по ширине слоя, что вносит некоторую неоднозначность в определение величины $2b$. На рис. 3 приведена зависимость от времени ширины слоя $2b(t)$, полученная в предположении об однородном распределении тока.

Основные экспериментальные результаты

На рис. 4 приведены типичные двумерные распределения интенсивности излучения плазмы токового слоя в последовательные моменты времени. Приведенные изображения были получены с использованием интерференционных фильтров с максимальным пропусканием на длинах волн 587.6 (линия HeI), 468.6 (линия HeII) и 569.6 нм (линия NII). При регистрации изображений в свете линии HeII использовался фотоаппарат, а изображения в свете линий HeI и NII удалось зарегистрировать только с использованием контактной фотоприставки, т.е. при увеличении чувствительности регистрации не менее чем в 10 раз. Следовательно, наиболее яркой линией видимого диапазона является линия иона гелия, тогда как интенсивность линий атомарного гелия, а также линий иона азота по крайней мере на порядок ниже.

Особенный интерес представляют изменения двумерных распределений интенсивности излучения в зависимости от времени и спектрального интервала. Как видно из рис. 4, уже через 0.4 мкс после возбуждения тока плазмы I_z излучающая область не обладает цилиндрической симметрией, а имеет два существенно различных характерных размера: ширину $2\delta x$ и толщину $2\delta y$ ($2\delta x \gg 2\delta y$), т.е. излучающая плазма приобретает форму слоя. В свете линии нейтрального гелия ширина слоя составляет $2\delta x_{\text{HeI}} \approx 7.5$ см при толщине $2\delta y_{\text{HeI}} \approx 0.9$ см, причем интенсивность излучения имеет минимум в середине слоя и максимальна при $x = \pm(1-3)$ см. В свете линии иона гелия распределение интенсивности излучения также имеет вид неоднородного слоя толщиной $2\delta y_{\text{HeII}} \approx 0.9$ см, но меньшей ширины $2\delta x_{\text{HeII}} \approx 5$ см. При этом уменьшение интенсивности излучения в середине слоя выражено менее ярко, чем в свете линии HeI.

В последующие моменты времени распределение интенсивности излучения нейтрального гелия по ширине слоя становится более однородным, причем ширина излучающей области увеличивается, достигая $2\delta x_{\text{HeI}} \approx 9$ см при $t = 1.4$ мкс. В свете линии иона гелия в это же время ширина слоя существенно меньше $2\delta x_{\text{HeII}} \approx 5.5$ см. При этом в середине слоя хорошо видна яркая компактная область размерами $2\delta x \approx 2$ см, $2\delta y \approx 0.9$ см. Вдали от нулевой линии, при $|x| > 2$ см, как интенсивность излучения иона гелия, так и толщина излучающей области значительно меньше, чем в середине слоя. Такой характер распределения интенсивности излучения линии HeII сохраняется и в более поздние моменты времени.

Наиболее сложная структура наблюдается в свете линий NII при $t = 1.4$ мкс. Интенсивность излучения имеет минимум шириной $2x \approx 3$ см в середине слоя и два симметричных максимума, расположенных в областях $x = \pm 1.5-6$ см, полная ширина слоя достигает $2\delta x_{\text{NII}} \approx 12$ см. При этом кроме излучения из собственно слоя наблюдается веерообразное свечение окружающей слой плазмы, вид которого обусловлен, по-видимому, магнитной структурой слоя.

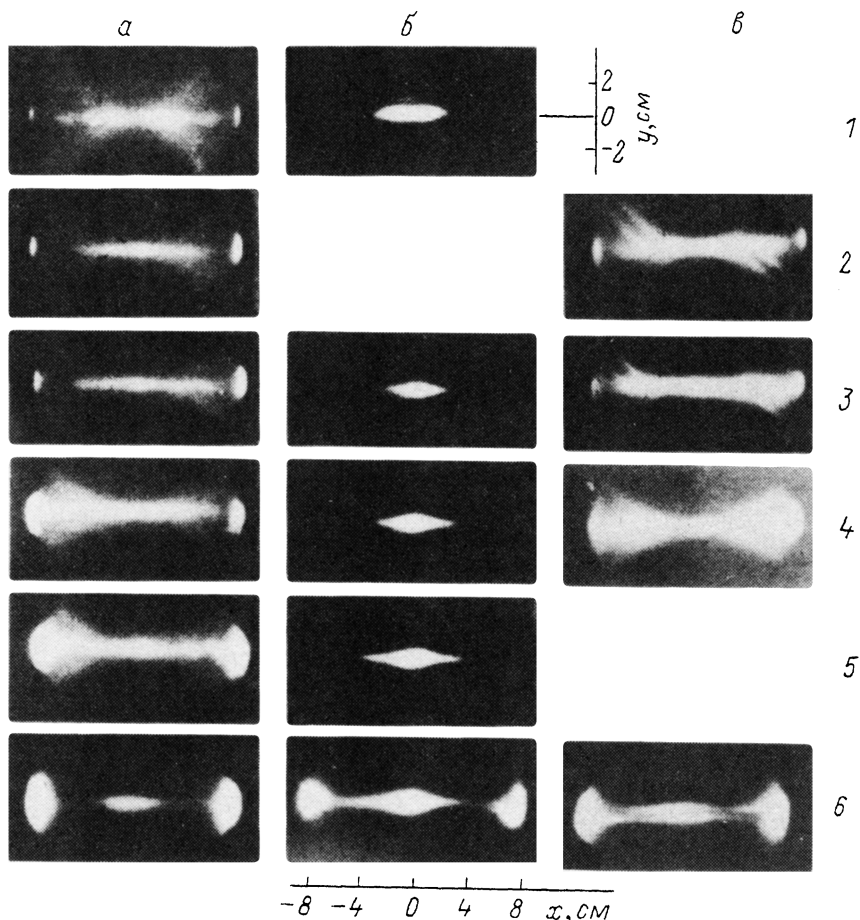


Рис. 4. Изображения плазмы токового слоя, полученные в эмиссионных линиях нейтрального гелия HeI 587.6 нм (а), иона гелия HeII 468.6 нм (б) и линий иона азота NII 567.6–568.6 нм (в) в последовательные моменты времени. 1 — 0.4, 2 — 0.9, 3 — 1.2, 4 — 1.4, 5 — 2.4, 6 — 3.5 мкс.

К моменту $t = 3.5$ мкс ширина слоя плазмы, излучающей в свете линии иона гелия, увеличивается до $2\delta x_{\text{HeII}} \approx 7.5$ см, а в свете линии нейтрального гелия становится меньше, чем в предшествующие моменты $2\delta x_{\text{HeI}} \approx 3.5$ см. Одновременно появляется поперечная структура в свете линий азота: минимум в средней плоскости слоя при $y = 0$ и два симметричных максимума при $y \approx \pm 0.2-0.6$ см.

Наряду со свечением плазмы в пределах собственно слоя существуют излучающие области, расположенные у его боковых краев, вблизи стенок вакуумной камеры. Интенсивность пристеночного излучения со временем возрастает. При $t \leq 2.4$ мкс она сравнима с интенсивностью излучения в линиях HeI и NII в середине слоя, а в спектральном диапазоне вблизи линии HeII пристеночное свечение не наблюдается вплоть до $t \approx 2.4$ мкс, т.е. его интенсивность существенно меньше интенсивности излучения иона гелия из слоя. К моменту $t = 3.5$ мкс интенсивность пристеночного излучения возрастает настолько, что становится срав-

нимой с интенсивностью излучения иона гелия из слоя и существенно превосходит интенсивность излучения в линиях HeI и HeII.

На рис. 3 приведены типичные зависимости от времени полного тока плазмы I_z (а) и двух значений B_φ -компоненты магнитного поля в точках $R = 9.3$ см, $\varphi = 0$ и $R = 9.3$ см, $\varphi = \pi/2$ вне вакуумной камеры (б), а также ширины токового слоя $2b$, которая вычислялась из этих данных (в). Как видно из рис. 3,б, имеется зависимость магнитного поля от углового положения зонда, которая свидетельствует о нарушении цилиндрической симметрии в распределении электрического тока в камере и указывает на формирование токового слоя. Различие в величинах B_φ , регистрируемых под углами 0 и $\pi/2$, становится заметным уже через 0.5 мкс после возбуждения тока плазмы I_z , хотя в этот момент различие невелико и, следовательно, ошибка в определении ширины токового слоя весьма значительна. Надежное определение ширины становится возможным, начиная с момента $t = 0.75$ мкс, когда $2b$ достигает величины 6.4 ± 1 см. В последующие моменты зависимость магнитного поля от углового положения зонда становится более ярко выраженной, что обусловлено увеличением ширины токового слоя. Максимального значения $2b = 11.8 \pm 0.6$ см ширина токового слоя достигает при $t = 3$ мкс, затем она несколько уменьшается и при $t = 3.5$ мкс составляет $2b = 10 \pm 1$ см.

Заключение

В настоящей работе применены две экспериментальные методики, ранее не использовавшиеся в исследованиях токовых слоев: это, во-первых, регистрация изображения излучающей плазмы в свете различных спектральных линий и, во-вторых, определение ширины токового слоя на основании измерений магнитного поля снаружи вакуумной камеры. Продемонстрирована работоспособность и эффективность этих методов, а также высокая наглядность результатов, получаемых с помощью электронно-оптических преобразователей в режиме регистрации изображения в комбинации с узкополосными спектральными фильтрами.

Полученные экспериментальные данные не противоречат сложившимся в настоящее время представлениям об основных свойствах плоских токовых слоев, формирование которых осуществляется в двумерных магнитных полях с нулевой линией. Это позволяет считать данные методики достаточно надежными и использовать их в дальнейшем, в том числе и для изучения эволюции токовых слоев в трехмерных магнитных конфигурациях [3].

Основные результаты, полученные в настоящей работе, заключаются в следующем.

1. Показано, что увеличение начального давления газа до ~ 300 мТор не препятствует формированию токового слоя значительной ширины $2\delta x \geq 10$ см; отношение ширины слоя к его толщине при этом $\delta x/\delta y \geq 10$. Более того, время формирования слоя, как и при меньшем давлении, не превышает 1 мкс. Для сформированного слоя ($t = 1.4$ мкс) ширина области интенсивного излучения линии HeII практически совпадает с шириной токового слоя, определенной на основании магнитных измерений.

2. Распределения интенсивности излучения на ранней стадии эволюции токового слоя, при $t = 0.4$ мкс, свидетельствуют о сильной нелинейности процесса формирования слоя: заметные возмущения температуры и плотности плазмы наблюдаются в первую очередь вдали от нулевой линии и, по-видимому, еще на стадии распространения начальных возмущений от границ плазмы к нулевой линии, когда азимутальная асимметрия в распределении плотности тока еще мала.

3. Пространственные распределения свечения плазмы в различных спектральных линиях, соответствующие одному и тому же моменту времени, существенно различаются между собой, что, по-видимому, связано с изменением электронной температуры плазмы по ширине слоя. Показательно в этом отношении формирование компактной области в середине слоя, которая сильно излучает в линии HeII, т.е. характеризуется более высокой электронной температурой по сравнению с другими участками слоя, более удаленными от центра. Естественно предположить, что в центре токового слоя формируется магнитная структура с замкнутыми силовыми линиями — магнитный остров, как это наблюдалось ранее в других начальных условиях [5,6,2].

4. Появление свечения у стенок вакуумной камеры в районе боковых краев слоя указывает на генерацию плазменных потоков, направленных вдоль поверхности слоя, из середины наружу, а также на эффективное взаимодействие этих потоков со стенками камеры. Возникновение такого рода потоков было зарегистрировано ранее в другом диапазоне давлений прямыми спектральными измерениями [7,8].

Данная работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 93-02-1619).

Список литературы

- [1] Франк А.Г. // Тр. ФИАН. 1985. Т. 160. С. 93-121.
- [2] Богданов С.Ю., Дрейден Г.В., Кирий Н.П. и др. // Физика плазмы. 1992. Т. 18. № 10. С. 1269-1295.
- [3] Буланов С.В., Франк А.Г. Физика плазмы. 1992. Т. 18. № 12. С. 1535-1544.
- [4] Бондарь Ю.Ф., Гоманько А.А., Кременцов В.И. и др. // ПТЭ. 1991. Т. 1. С. 142-144.
- [5] Богданов С.Ю., Марков В.С., Франк А.Г. // Письма в ЖЭТФ. 1982. Т. 35. Вып. 6. С. 232-235.
- [6] Кирий Н.П., Марков В.С., Франк А.Г. // Письма в ЖЭТФ. 1992. Т. 56. Вып. 2. С. 82-86.
- [7] Frank A.G., Kyrie N.P., Markov V.S., Savchenko M.M. // Proc. XVII Intern. Conf. Phenom. Ion. Gases. Budapest, 1985. Vol. 1. P. 102-104.
- [8] Великанова Л.Г., Кирий Н.П., Киселев Д.Т. и др. // Физика плазмы. 1992. Т. 18. № 12. С. 1545-1557.