



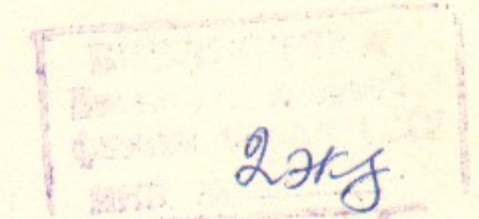
A.74  
1988

30.1.89  
11

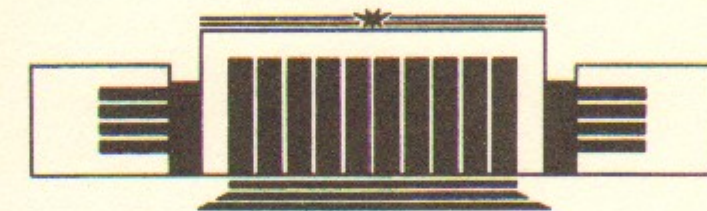
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

В.В. Анциферов, В.В. Бескоровайный,  
Ю.И. Бельченко, Г.Е. Деревянкин,  
А.М. Максимов, В.Г. Панькин, Л.П. Скрипаль

СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
ПЛАЗМЫ ВОДОРОДНО-ЦЕЗИЕВОГО РАЗРЯДА



ПРЕПРИНТ 88-116



НОВОСИБИРСК



## Спектроскопические исследования плазмы водородно-цезиевого разряда

*В.В. Анциферов, В.В. Бескоровайный,  
Ю.И. Бельченко, Г.Е. Деревянкин,  
А.М. Максимов, В.Г. Панькин, Л.П. Скрипаль*

### АННОТАЦИЯ

С помощью спектроскопических методик исследована плазма сильноточного тлеющего водородно-цезиевого разряда с планотронной геометрией электродов. Определен элементный и зарядовый состав плазмы. Исследована динамика отдельных спектральных линий водорода, цезия и материала электродов — молибдена при различных параметрах разряда. Прослежено изменение плотностей атомарного водорода, атомарного и ионизированного цезия и распыление электродов в течение разрядного импульса.

С высоким спектральным разрешением измерены контуры линий  $H_{\alpha}$  и  $H_{\beta}$  за один импульс ( $10^{-3}$  с) разряда. Получены оценки температуры атомов водорода и концентрации электронов в плазме. Измерена энергия излучения плазмы разряда в диапазоне спектра 400—800 нм.

### ВВЕДЕНИЕ

Сильноточный тлеющий разряд в водороде с добавлением цезия широко применяется в различных модификациях ионных источников для высокоэнергетичных атомарных инжекторов термоядерных установок и ускорителей [1, 2], вместе с тем физические процессы и характеристики плазмы подобных разрядов изучены недостаточно. В отличие от цезиево-водородных разрядов повышенной плотности [3, 4] сильноточные разряды в магнитном поле с добавкой цезия имеют более сложную структуру, большое влияние на их характеристики оказывают сугубо неравновесные процессы на электродах, что не позволяет использовать для расчета параметров плазмы простые теоретические модели локального термодинамического равновесия, максвелловского распределения электронов по энергиям и т. п.

Малая толщина плазменных слоев подобных разрядов, влияние магнитного поля и адсорбция цезия затрудняют использование зондовых методов для измерения параметров плазмы таких разрядов. Более адекватной для исследования характеристик плазмы сильноточных разрядов является спектроскопическая методика. Этот метод имеет ряд существенных преимуществ: бесконтактность измерений и отсутствие возмущающего действия на объект, высокие чувствительность, избирательность и скорость измерений, невосприимчивость к электромагнитным помехам. Впервые попытки определить параметры плазмы водородно-цезиевых сильноточных разрядов в магнитном поле на основе спектроскопических



измерений были предприняты в 1977 году [5]. Позднее детальные спектроскопические измерения излучения плазмы позволили оценить плотность и температуру атомов в водородно-цезиевом разряде с пеннинговской геометрией электродов [6, 7].

В настоящей работе описаны методики и приводятся результаты спектроскопических измерений излучения плазмы сильноточного разряда с планотронной геометрией электродов. Определен элементный и зарядовый состав плазмы, прослежено изменение плотности атомарного водорода, атомов и ионов цезия и распыление электродов в течение разрядного импульса. Определена температура атомов водорода, концентрация плазмы. Измерена энергия излучения плазмы планотронного разряда в диапазоне спектра 400—800 нм.

### 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО

Исследовалось излучение плазмы сильноточного водородно-цезиевого разряда с планотронной геометрией электродов, детально описанного в [8]. Схема применявшегося планотрона приведена на рис. 1. Массивный катод, изготовленный из

особо чистого молибдена, располагался внутри анодной камеры, сделанной также из молибдена. В нижней крышке анодной камеры было сделано диагностическое окно площадью  $0,6 \times 15$  мм для вывода излучения плазмы на диагностическую аппаратуру. Обращенная к диагностическому окну поверхность катода имела форму вогнутого цилиндрического желоба с радиусом кривизны 7 мм (для геометрической фокусировки частиц, образуемых на вогнутой поверхности катода [9]).

Внешнее магнитное поле, направление которого показано стрелкой, обеспечивало осцилляцию электронов в зоне между про-

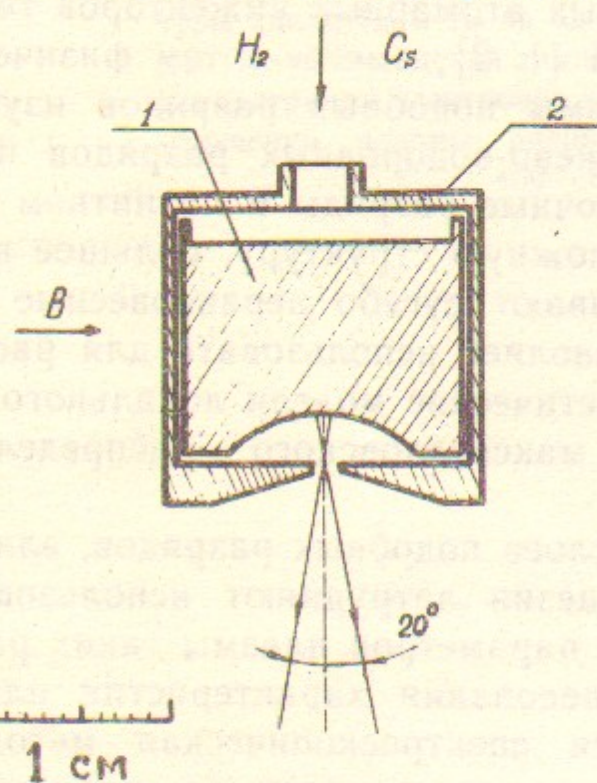


Рис. 1. Схема газоразрядной камеры:  
1—катод, 2—анод.

тивоположными сторонами катодного желоба и их дрейф вдоль желоба в скрещенных  $E \times B$  полях. Для замыкания дрейфа электронов вокруг катода на его торцах и в верхней части катода были сделаны боковые выступы, ограничивающие уход электронов на анод (шпилькообразный катод).

Сильноточный тлеющий разряд поджигался при импульсном напуске очищенного водорода через отверстие в анодной камере. Цезий подавался в разряд из внешнего нагреваемого контейнера, содержащего цезированный пирографит.

Основные параметры газоразрядного устройства:

Напряжение разряда, В	100—600
Ток разряда, А	10—150
Длительность импульса, мкс	35; 850
Частота следования импульсов, Гц	1—10
Магнитное поле, кГс	0,5—1,5
Плотность молекул водорода, $\text{см}^{-3}$	до $10^{16}$
Плотность цезия, $\text{см}^{-3}$	до $10^{13}$
Температура катода, °С	400—800
Температура анода, °С	200—400
Площадь катода, $\text{см}^2$	5

Наблюдалось несколько устойчивых режимов работы водородно-цезиевого разряда, отличающихся напряжением разряда и видом вольт-амперной характеристики (рис. 2). Режим IV осуществлялся в чисто-водородном разряде без цезия на обезгаженных предварительной тренировкой электродах. Водородно-цезиевые режимы I—III отличались количеством накопленного на электродах цезия и определялись температурой электродов и скоростью подачи цезия в разряд.

Режим III—цезия на электродах мало; в режиме I электроды хорошо активированы цезием, покрытие близко к монослойному ( $\theta = 0,5 \div 1$ ).

### 2. ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ АППАРАТУРА

Излучение плазмы водородно-цезиевого разряда через диагностическое окно в анодной камере и кварцевое стекло в стенке вакуумного объема выводилось наружу и с помощью двух линз фоку-



сировалось на входные окна приборов регистрирующей системы. Применялись четыре схемы оптической регистрации (рис. 3).

Спектрограммы излучения плазмы в диапазоне 230—900 нм снимались с помощью спектрографа СТЭ-1 (схема I, рис. 3), при этом свет транспортировался с помощью волоконно-оптического кабеля (ВОК). На основе спектрограмм определялся элементный и зарядовый состав плазмы.

По второй схеме (рис. 3) с помощью монохроматора МДР-2 и фотоэлектронных умножителей ФЭУ-83, 84 и осциллографа С8-13 проводились фотоэлектронные измерения интенсивности излучения отдельных спектральных линий водорода, цезия, молибдена. Прослеживалось изменение интенсивности отдельных линий на фронтах и в течение разрядного импульса, определялась относительная интенсивность различных спектральных линий.

По схеме III (рис. 3) с помощью интерферометра Фабри—Перо (ИФП) снимались интерферограммы спектральных линий  $H_{\alpha}$  и  $H_{\beta}$ . Для снижения потерь света использовались специально разработанные интерференционные фильтры (ИФ) и зеркала интерферометров Фабри—Перо. Полоса пропускания ИФ по уровню 0,5 составляла 4 нм, коэффициент пропускания достигал 80%. Спектральное разрешение ИФП составляло 1/50 от области дисперсии, которая для приведенных интерферограмм имела величину  $2,5 \text{ см}^{-1}$ . Использование фильтров с повышенным коэффициентом пропускания и интерференционных зеркал с малым поглощением позволило на два порядка увеличить эффективность регистрирующей системы и получать интерферограммы линий  $H_{\alpha}$ ,  $H_{\beta}$  за один импульс разряда (850 мкс). Интерферограммы снимались на высокочувствительную пленку (тип 29) фотоаппаратом «Зенит» с объективом, имеющим фокус 300 мм.

Энергия излучения плазмы разряда в области спектра  $400 \div 800 \text{ нм}$ , усредненная за импульс разряда, измерялась по схеме IV рис. 3. При измерениях ИК часть спектра устранялась калиброванным светофильтром, тогда как УФ-излучение плазмы обрезалось спектральной чувствительностью приемника-преобразователя РТН-30. Время релаксации преобразователя составляло 0,12 с.

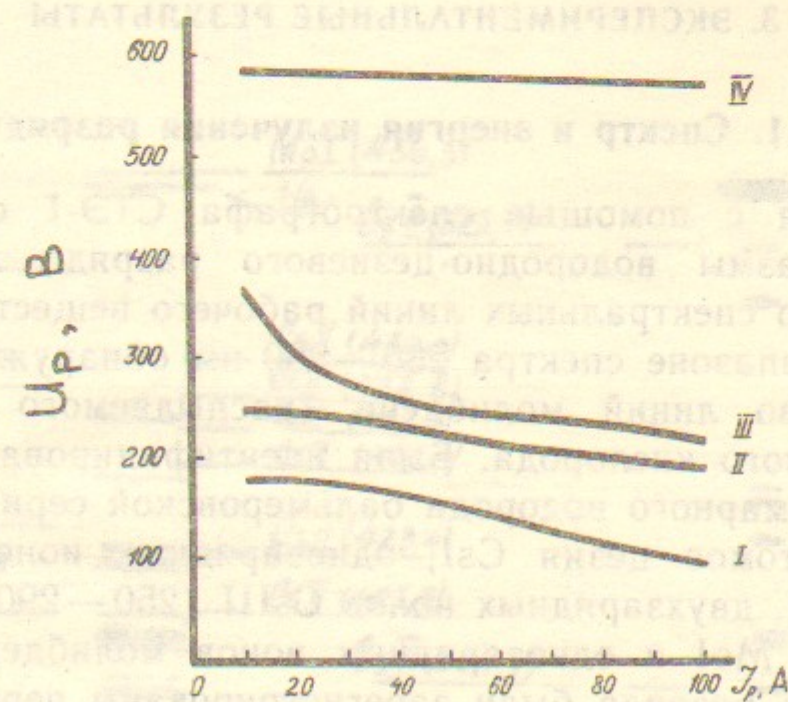


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики различных режимов сильноточного тлеющего разряда с планотронной геометрией электродов.

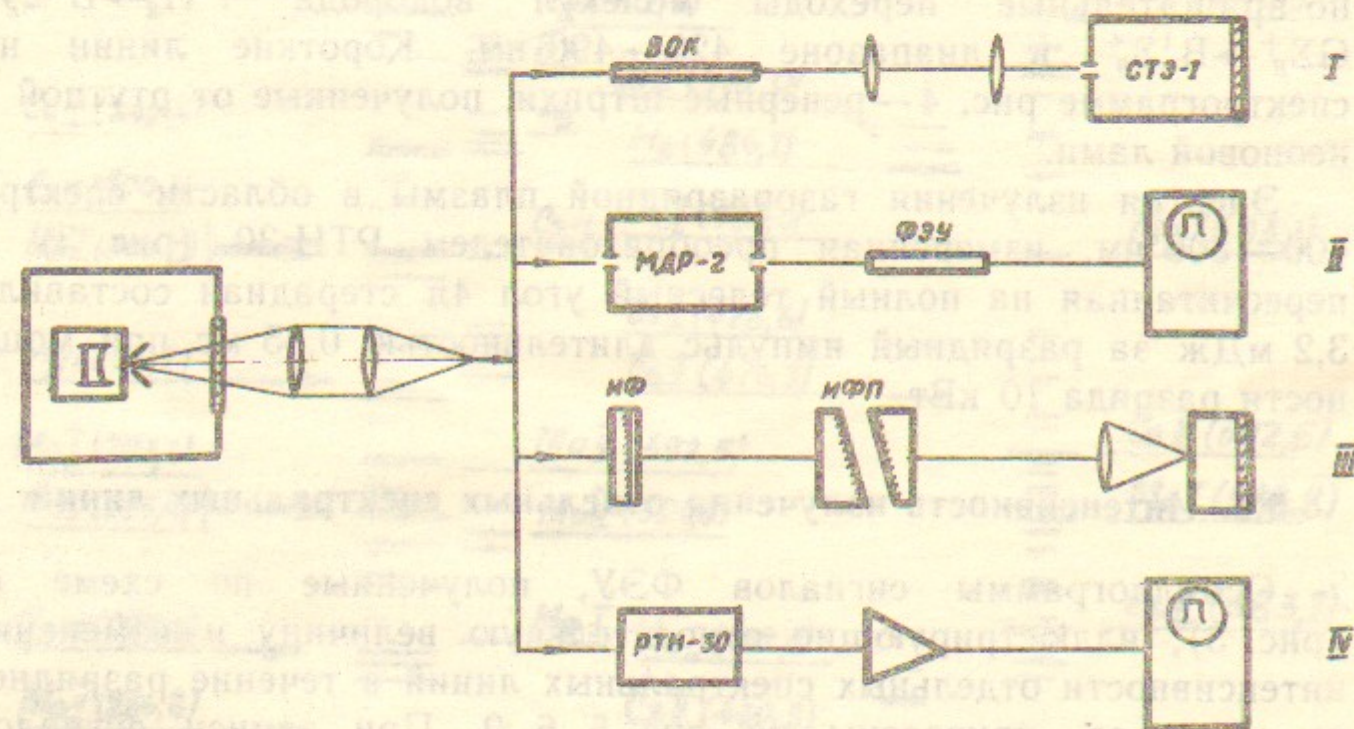


Рис. 3. Блок-схема регистрирующей оптической системы.

I—регистрация спектра излучения плазмы: ВОК—волоконно-оптический кабель, СТЭ-1—спектрограф. II—фотоэлектронная регистрация интенсивности спектральных линий: МДР-2—монохроматор. III—регистрация контура линий  $H_{\alpha}$  и  $H_{\beta}$ : ИФ—интерференционный фильтр, ИФП—интерферометр Фабри—Перо. IV—измерение энергии излучения плазмы: РТН-30—полупроводниковый преобразователь.



### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

#### 3.1. Спектр и энергия излучения разряда

Полученная с помощью спектрографа СТЭ-1 спектрограмма излучения плазмы водородно-цезиевого разряда приведена на рис. 4. Помимо спектральных линий рабочего вещества — водорода и цезия, в диапазоне спектра 230—900 нм обнаруживалось большое количество линий молибдена (распыляемого с катода) и линий примесного кислорода. Были идентифицированы спектральные линии атомарного водорода бальмеровской серии ( $H_\alpha$ ,  $H_\beta$ ,  $H_\gamma$ ,  $H_\delta$ ), линии атомов цезия CsI, однозарядных ионов цезия CsII (300—650 нм), двухзарядных ионов CsIII (250—290 нм), а также линии атомов MoI и однозарядных ионов молибдена MoII. При больших токах разряда были зарегистрированы переходы с высоковозбужденных уровней атомов цезия с  $n_{\max}$  до 15 ( $15P_{3/2} \rightarrow 6S_{1/2}$ ).

Регистрировался линейчатый спектр молекул водорода  $d^3\Pi_u \rightarrow a^3\Sigma_g^+$  ( $\alpha$ -система Фулхера, 580—620 нм) и электронно-вращательные переходы молекул водорода  $I^1\Pi_g \rightarrow V^1\Sigma_g^+$ ,  $G\Sigma_g^+ \rightarrow V^1\Sigma_u^+$  в диапазоне 420—490 нм. Короткие линии на спектрограмме рис. 4 — реперные штрихи, полученные от ртутной и неоновой ламп.

Энергия излучения газоразрядной плазмы в области спектра 400—800 нм, измеренная преобразователем РТН-30 (рис. 3) и пересчитанная на полный телесный угол 4л стерадиан составила 3,2 мДж за разрядный импульс длительностью 0,85 мс при мощности разряда 10 кВт.

#### 3.2. Интенсивность излучения отдельных спектральных линий

Осциллограммы сигналов ФЭУ, полученные по схеме II (рис. 3), иллюстрирующие относительную величину и изменение интенсивности отдельных спектральных линий в течение разрядного импульса, приведены на рис. 5, 6, 9. При записи сигналов рис. 5, 6 флуктуации и шумы обрезались с помощью RC-фильтров, при получении осциллограмм рис. 9 использовалась более широкополосная система регистрации. На рис. 5 приведена сводка осциллограмм для газоразрядного режима I. Осциллограммы рис. 6, соответствующие более высоковольтному газоразрядному режиму III, получены в укороченном импульсе (35 мкс) и позволяют

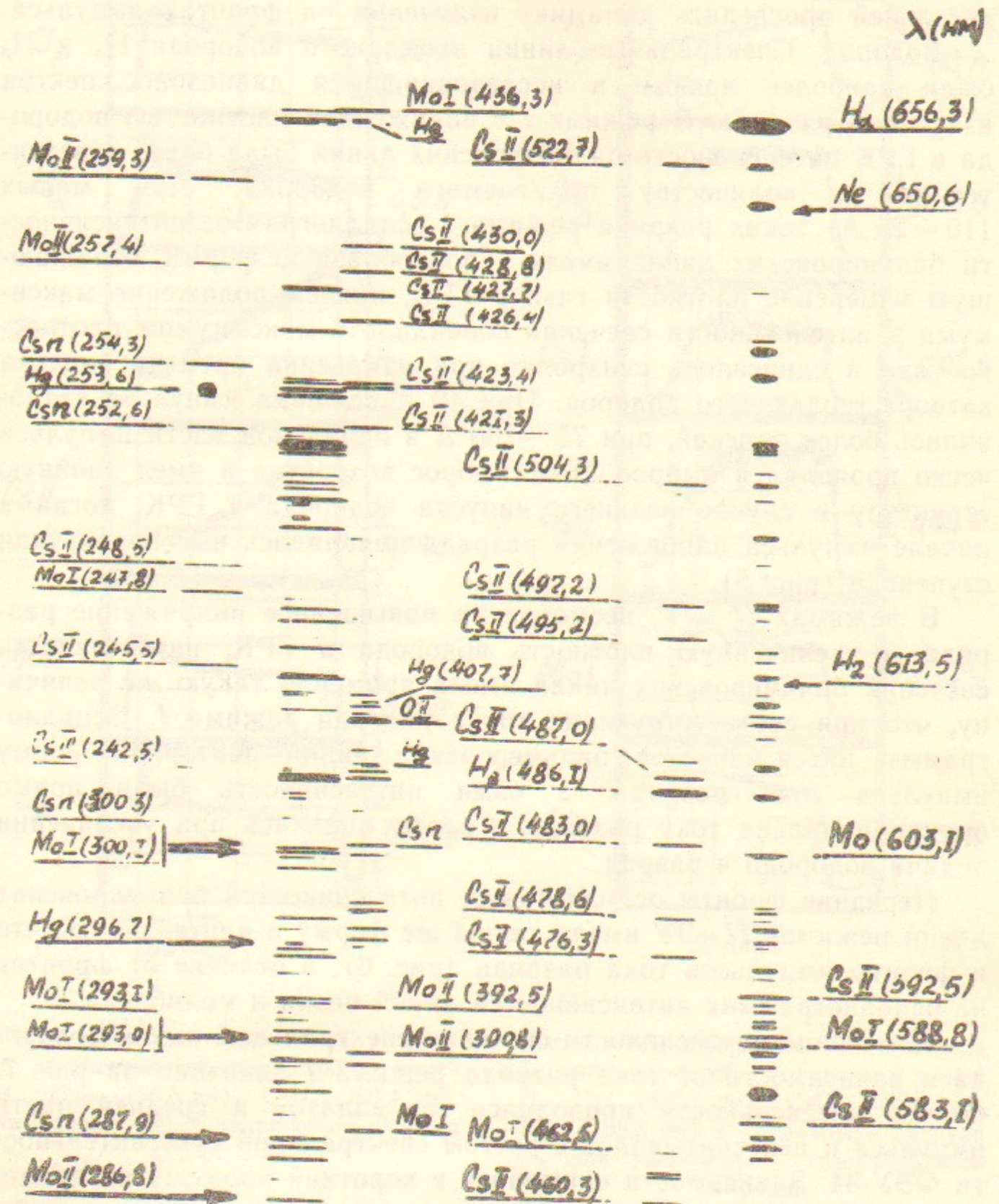


Рис. 4. Спектрограммы излучения плазмы водородно-цезиевого разряда. Также приведены реперные линии элементов Hg и Ne, полученные от ртутной и неоновой ламп.



детальной проследить динамику излучения на фронтах импульса.

**Водород.** Спектральные линии атомарного водорода  $H_\alpha$  и  $H_\beta$  были наиболее яркими в исследованном диапазоне спектра излучения разряда. В режиме *I* с пониженной плотностью водорода в ГРК интенсивность бальмеровских линий была более чувствительна к количеству подаваемого водорода. При малых (10—20 А) токах разряда режима *I* осциллограммы интенсивности бальмеровских линий имели куполообразную форму, отражающую изменение плотности газа в ГРК, причем положение максимума в интенсивности свечения совпадало с максимумом плотности газа и сдвигалось синхронно при изменении времени запуска затвора, подающего водород. При 40 А вершина импульса становилась более плоской, при 75—100 А в начальной части импульса четко проявлялся выброс. Этот выброс возрастал и имел двойную структуру в случае позднего напуска водорода в ГРК, когда в начале импульса напряжения разряда появлялась высоковольтная ступенька (рис. 5).

В режимах *II—IV*, несмотря на повышенное напряжение разряда и увеличенную плотность водорода в ГРК, интенсивность свечения бальмеровских линий имела примерно такую же величину, что и при соответствующих токах разряда режима *I*. Осциллограммы интенсивностей бальмеровских линий повторяли форму импульса тока разряда, а сама интенсивность была прямо пропорциональна току разряда и слабо менялась при увеличении подачи водорода в разряд.

Передние фронты осциллограмм интенсивностей бальмеровских линий режимов *II—IV* имели такую же форму и длительность, что и фронты импульсов тока разряда (рис. 6), в отличие от фронтов на осциллограммах интенсивностей линий цезия и молибдена.

Изменение интенсивности свечения спектральных линий водорода в зависимости от тока разряда режима *I* показано на рис. 7. Отсчет интенсивности проводился на «плато» в средней части импульса и пересчитывался с учетом спектральной чувствительности ФЭУ-84. Зависимости снимались в короткий промежуток времени при переходе от больших токов разряда к меньшим, так, чтобы тепловой режим электродов не успевал изменяться, при этом подача водорода минимизировалась при больших токах и далее не менялась.

В диапазоне токов разряда 20—50 А интенсивность излучения водородных линий возрастала пропорционально току разряда. Далее темп прироста интенсивности линий  $H_\alpha$ ,  $H_\beta$  замедлялся, а

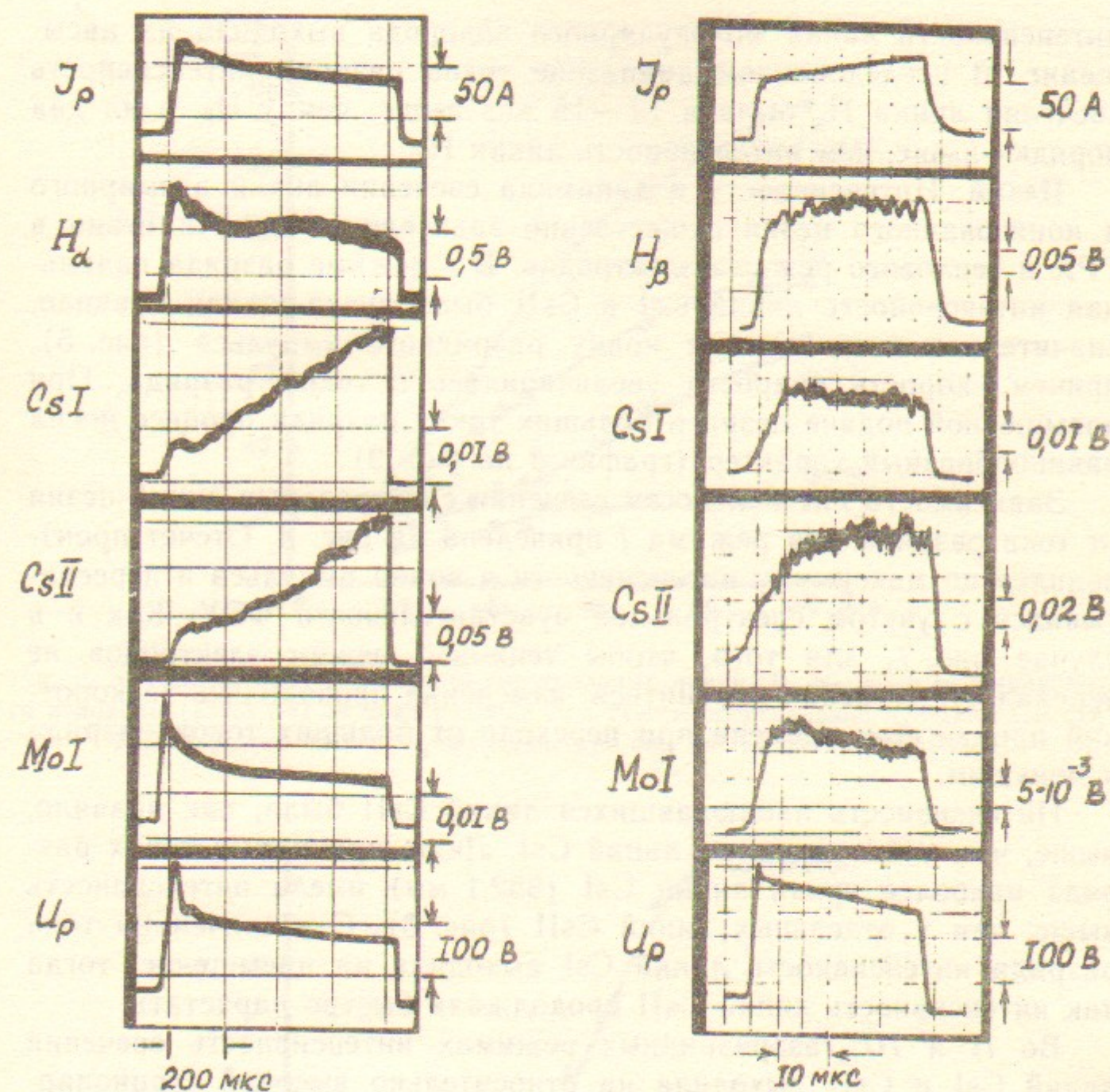


Рис. 5. Осциллограммы тока разряда  $I_p$ , интенсивностей спектральных линий  $H_\alpha$ , Cs I (455,5 нм), Cs II (460,4 нм), Mo I (553,3 нм) и напряжения разряда  $U_p$  в режиме *I*.

Рис. 6. Осциллограммы тока разряда  $I_p$ , интенсивностей спектральных линий  $H_\beta$ , Cs I (455,5 нм), Cs II (460,4 нм), Mo I (553,3 нм) и напряжения разряда  $U_p$  для укороченного газоразрядного импульса.



интенсивность линий молекулярного водорода выходила на насыщение. В исследованном диапазоне токов разряда интенсивность свечения линии  $H_\alpha$  была в 12—15 раз выше, чем у  $H_\beta$ , и на два порядка выше, чем интенсивность линии  $H_\gamma$ .

**Цезий.** Интенсивность и динамика свечения линий атомарного и ионизованного цезия существенно зависели от подачи цезия в ГРК и теплового режима электродов. В *I* режиме разряда начальная интенсивность линий CsI и CsII была низка и, как правило, значительно возрастала к концу разрядного импульса (рис. 5), причем скорость прироста увеличивалась с током разряда. При повышенной подаче цезия и больших токах разряда процесс носил лавинообразный характер (график 3 на рис. 9).

Зависимость интенсивности свечения спектральных линий цезия от тока разряда для режима *I* приведена на рис. 8. Отсчет производился по максимуму интенсивности в конце импульса и пересчитывался с учетом спектральной чувствительности ФЭУ. Как и в случае рис. 7, для того, чтобы тепловой режим электродов не успевал существенно измениться, измерения проводились за короткий промежуток времени при переходе от больших токов разряда к меньшим.

Интенсивность наблюдавшихся линий CsII была, как правило, выше, чем у большинства линий CsI. Лишь при малых токах разряда наиболее яркая линия CsI (852,1 нм) имела интенсивность выше, чем у отдельных линий CsII (рис. 8). С увеличением тока разряда интенсивность линий CsI выходила на насыщение, тогда как интенсивность линий CsII продолжала быстро нарастать.

Во *II* и *III* газоразрядных режимах интенсивность свечения линий CsI и CsII выходила на относительно высокий стационарный уровень через 5—10 мкс после включения разряда, слабо меняясь в течение остальной части импульса (рис. 6), а интенсивность свечения линий CsII была пропорциональна первой степени тока разряда.

Передние фронты импульсов интенсивности спектральных линий цезия (и молибдена) были более растянуты по длительности, чем фронты импульсов тока разряда и бальмеровских линий, тогда как задние фронты были, наоборот, более крутыми, нежели у тока разряда и бальмеровских линий (рис. 6).

**Молибден.** Интенсивность свечения спектральных линий распыляемого с электродов ГРК молибдена имела относительно низкую величину и в режиме *I* была максимальной в начале газоразрядного импульса (рис. 5). Амплитуда выброса в начале импульса

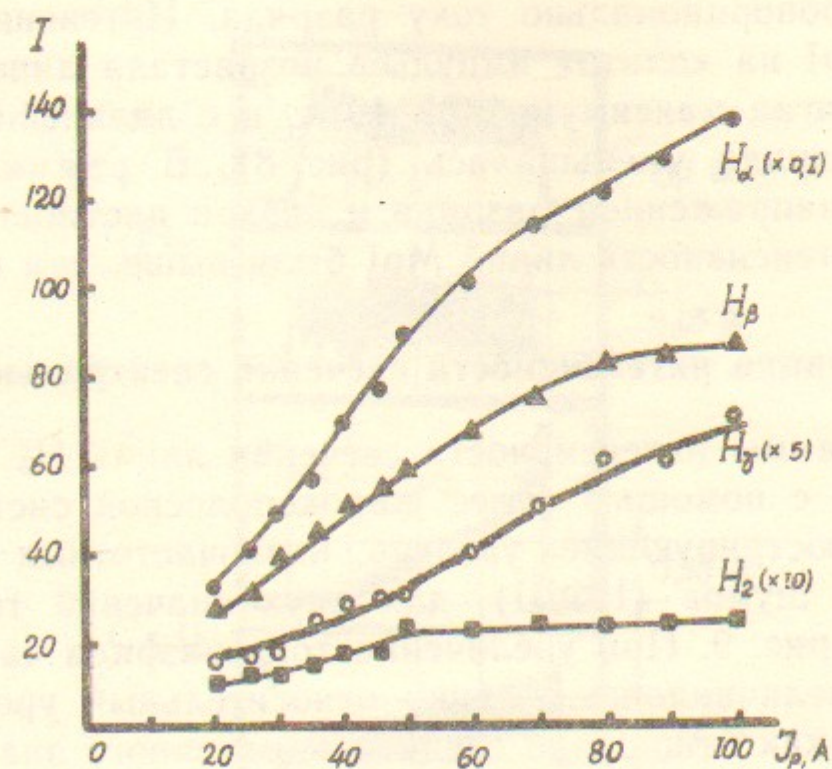


Рис. 7. Зависимость интенсивностей спектральных линий  $H_\alpha$ ,  $H_\beta$ ,  $H_\gamma$  и молекулярного водорода (458,3 нм) от тока разряда  $I_p$  с учетом спектральной чувствительности ФЭУ. *I* режим. Отсчет производился на 400 мкс от начала импульса.

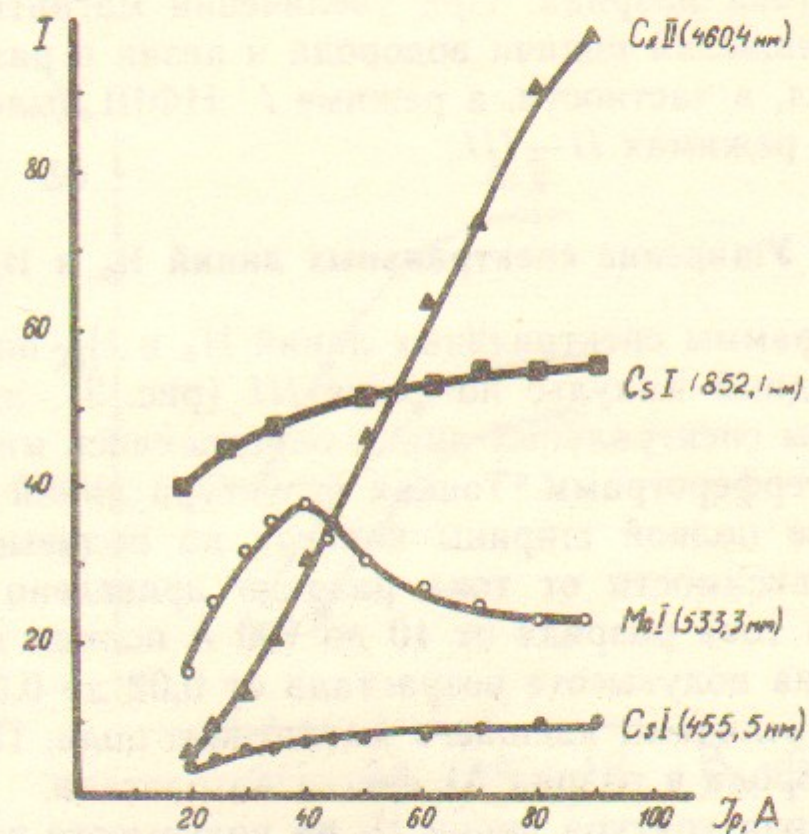


Рис. 8. Зависимость интенсивностей спектральных линий цезия и молибдена от тока разряда  $I_p$  с учетом спектральной чувствительности ФЭУ. *I* режим.



возрастала пропорционально току разряда. Интенсивность свечения линий MoI на «плато» импульса возрастала линейно с током разряда, достигая максимума при 40 А, и с дальнейшим увеличением тока разряда уменьшалась (рис. 8). В режимах II—IV с повышенным напряжением разряда и низкой плотностью цезия на электродах интенсивность линий MoI была выше, чем в режиме I.

### 3.3. Флуктуации интенсивности свечения спектральных линий

Осциллограммы интенсивности свечения линий  $H_{\beta}$  и CsII (460,4 нм), снятые с помощью более широкополосной системы регистрации и иллюстрирующие уровень низкочастотных ( $< 10^6$  Гц) флуктуаций и шумов (НФШ), для двух значений тока разряда приведены на рис. 9. При увеличении тока разряда частота и уровень НФШ увеличивались, однако относительный уровень НФШ, определяемый как отношение среднеквадратичного значения флуктуаций к среднему значению интенсивности, при увеличении тока разряда, как правило, уменьшался (рис. 9).

Зависимость относительного уровня НФШ интенсивности спектральных линий  $H_{\beta}$  и CsII от внешнего магнитного поля приведена на рис. 10. Там же показано изменение относительного уровня НФШ тока разряда. При увеличении магнитного поля, а также при уменьшении подачи водорода и цезия в разряд уровень НФШ возрастал, в частности, в режиме I НФШ были существенно ниже, чем в режимах II—III.

### 3.4. Уширение спектральных линий $H_{\alpha}$ и $H_{\beta}$

Интерферограммы спектральных линий  $H_{\alpha}$  и  $H_{\beta}$ , полученные за один газоразрядный импульс по схеме III (рис. 3), приведены на рис. 11. Контуры спектральных линий определялись микрофотометрированием интерферограмм. Тонкая структура линий не проявлялась. Изменение полной ширины контура на полувысоте  $\Delta\lambda$  для линии  $H_{\alpha}$  в зависимости от тока разряда приведено на рис. 12. При увеличении тока разряда от 10 до 100 А полная ширина контура линии  $H_{\alpha}$  на полувысоте возрастала от 0,03 до 0,06 нм и слабо зависела от величины внешнего магнитного поля. При увеличении подачи водорода в разряд  $\Delta\lambda$  слегка возрастала.

Полная ширина контура линии  $H_{\beta}$  на полувысоте при токе разряда 100 А имела величину  $\sim 4 \cdot 10^{-2}$  нм.

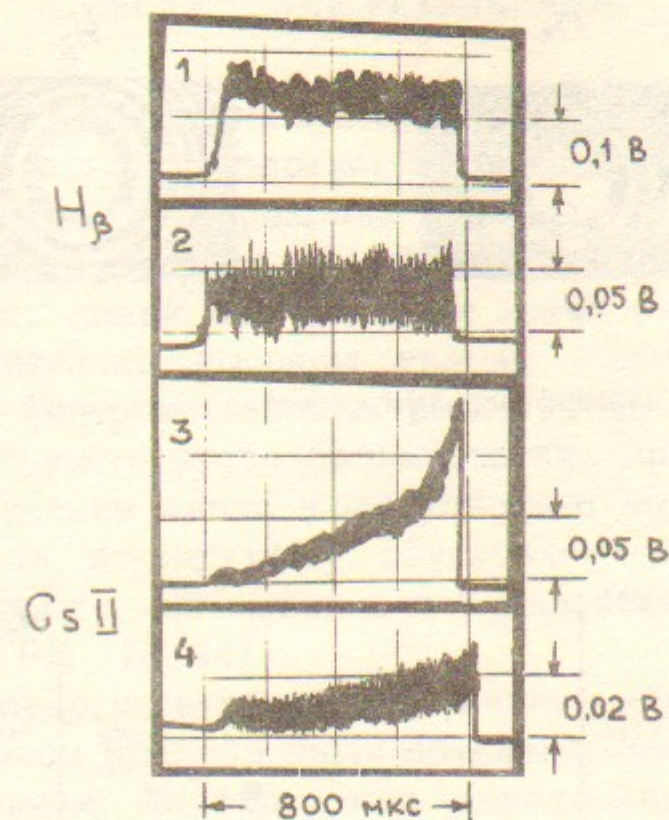


Рис. 9. Осциллограммы интенсивностей спектральных линий  $H_{\beta}$  (1, 2) и CsII (3, 4), снятые широкополосной системой регистрации. I режим. 1, 3—ток разряда 100 А; 2, 4—30 А.

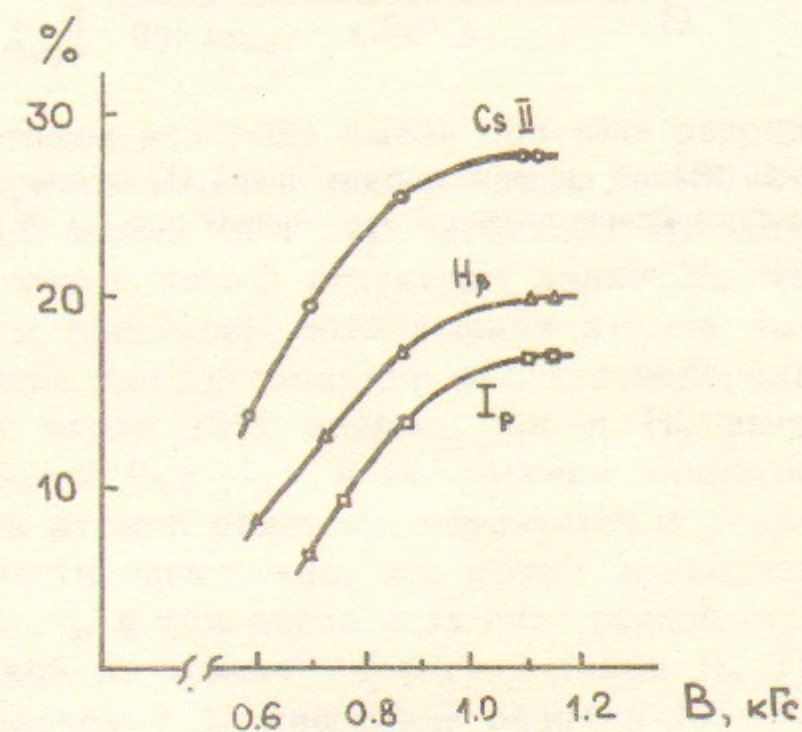


Рис. 10. Зависимость относительного уровня низкочастотных флуктуаций и шумов спектральных линий CsII (460,4 нм),  $H_{\beta}$  и тока разряда  $I_p$  от внешнего магнитного поля.



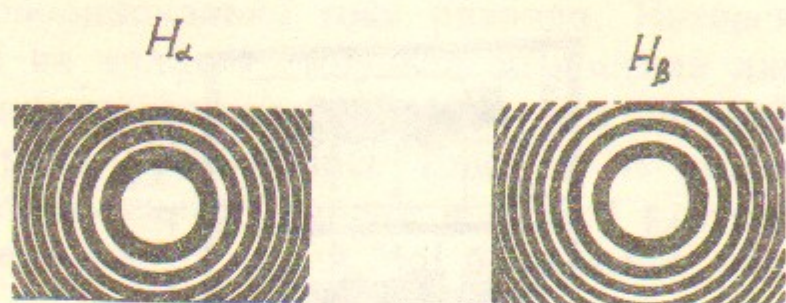


Рис. 11. Интерферограммы спектральных линий  $H_\alpha$  и  $H_\beta$ .

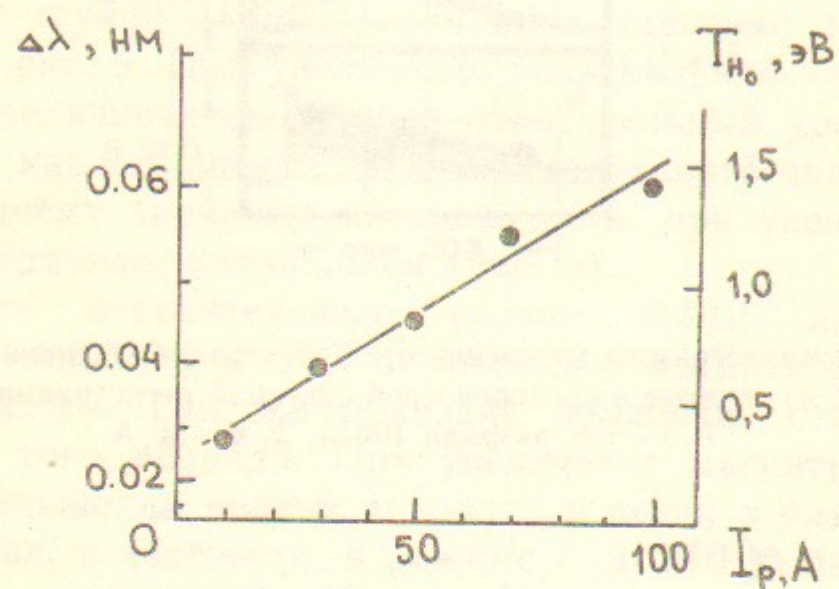


Рис. 12. Зависимость полной ширины контура линий  $H_\alpha$  на полувысоте  $\Delta\lambda$  (левая шкала) и температуры атомов водорода  $T_{H_0}$  (правая шкала) от тока разряда  $I_p$ .

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

4.1. Из спектроскопических измерений следует, что в  $I$  режиме активированных электродов плотность атомарного водорода в разряде пропорциональна току разряда в диапазоне 10—50 А и чувствительна к подаче водорода. Начальный выброс в осциллограммах бальмеровских линий при больших токах разряда свидетельствует об относительно высоком вкладе атомарного водорода, десорбируемого с поверхностей электродов ГРК.

Замедление скорости роста бальмеровских линий и насыщение интенсивности свечения линий молекулярного водорода при больших токах разряда, по-видимому, обусловлено вытеснением водорода из зоны разряда, примыкающей к диагностическому окну, в боковые зазоры ГРК [13, 14].

Экспериментально регистрируемая ширина контура линии  $H_\alpha$  и ее изменение с током разряда были обусловлены, в основном, доплеровским уширением. Аппаратурная ширина линии эталона Фабри—Перо, измеренная одночастотным He-Ne лазером ( $\lambda = 6328 \text{ \AA}$ ) составляла  $10^{-3}$  нм при базе эталона 2 мм. Штарковским уширением линии  $H_\alpha$  ( $\Delta\lambda \sim 5 \cdot 10^{-3}$  нм при  $n_e \sim 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ) можно было пренебречь.

Определенная по формуле доплеровского уширения

$$kT_{[eB]} \simeq 4 \cdot 10^2 (\Delta\lambda_{[nm]})^2$$

температура атомов водорода имела при токе разряда 10 А значение 0,3 эВ и при увеличении тока разряда до 100 А возросла до 1,4 эВ (правая шкала рис. 12). Отметим, что данные значения получены без учета тонкой структуры линии  $H_\alpha$ , что верно, если преобладающим процессом возбуждения атомов является, например, возбуждение при диссоциации молекул водорода электронным ударом, когда около 70% энергии линии  $H_\alpha$  высвечивается по переходу  $3^2D_{5/2} \rightarrow 2^2P_{3/2}$  [11]. В импульсном планотронном разряде заметная часть атомов водорода образуется в результате десорбции с поверхности электродов, что может приводить к уширению контура линии  $H_\alpha$ , в том числе и за счет тонкой структуры. Пересчет с поправкой на тонкую структуру линии  $H_\alpha$  [10] давал для приведенных значений  $\Delta\lambda$  при токах разряда 10—30 А более низкие значения температуры атомов в разряде 0,2—0,5 эВ.

4.2. Из соотношения интенсивности бальмеровских линий можно оценить температуру электронов в разряде в приближении

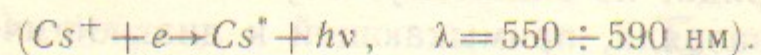


локального термодинамического равновесия и максвелловского распределения электронов по энергиям. Расчет по формуле

$$kT_e = E_j - E_i / \ln[(A_j g_j \lambda_i I_i k_i) / (A_i g_i \lambda_j I_j k_j)]$$

(обозначения стандартные, см., например, [6, 7]) давал для определенной «по водороду» температуры электронов в разряде низкую величину  $T_e \approx 0,3 - 0,4$  эВ.

Аномально низкое значение температуры электронов получалось при сравнении интенсивностей различных цезиевых линий, а также по распределению интенсивностей в спектре рекомбинационного континуума на уровень  $5d$



При этом температура низкоэнергетичной части электронов рассчитывалась по наклону прямой  $\ln(I/\nu) = f(h\nu - \lambda\nu_0)$ , где  $I$  — интенсивность континуума,  $\nu$  — частота,  $\nu_0$  — граничная частота [15]. Так как сечение рекомбинации обратно пропорционально энергии электронов  $(h\nu - h\nu_0)\sigma = \text{const}$ , это исключает необходимость введения поправок на предэкспоненциальный член при вычислении температуры по наклону полулогарифмических прямых. «Цезиевая» температура электронов составила 0,12 эВ и очень слабо зависела от плотности цезия. Интенсивность рекомбинационного континуума убывала квадратично с уменьшением тока разряда.

Аномально низкие значения «температуры» электронов свидетельствовали об ограниченной применимости модели ЛТР в условиях сильноточного тлеющего разряда с сугубо неравновесным характером процессов на поверхности электродов. Наряду с низкоэнергетичной группой максвеллизированных электронов в планотронном и подобных ему сильноточных разрядах в скрещенных полях, по-видимому, нужно учитывать роль группы быстрых первичных электронов.

4.3. Сравнение интенсивностей свечения линий CsI и CsII показывает, что в течение разрядного импульса в режимах I—III цезий преимущественно ионизован. Относительно большая величина сигнала CsI (852,1 нм) обусловлена тем, что, несмотря на высокую степень ионизации цезия в разряде, заметную часть времени своего движения в объеме ГРК цезиевая частица проводит в виде атома. Ион цезия электрическим полем разряда быстро пере-

носится на катод, однако после поверхностной рекомбинации и десорбции атом цезия возвращается в плазму разряда с небольшой скоростью [16].

Большая длительность (5—10 мкс) передних фронтов сигналов CsI и CsII обусловлена дополнительным выделением цезия в разряд за счет бомбардировки электродов. При этом во II и III режиме с более горячими электродами исходная плотность цезия в объеме ГРК имеет повышенную величину, тогда как концентрация цезия на электродах мала. Коэффициент распыления цезия ввиду повышенного содержания ионов цезия в токе на катод и увеличенного напряжения разряда имеет высокую величину, что способствует быстрому выходу сигналов CsI и CsII на относительно высокий стационарный уровень (рис. 6). Замедленный, линейный рост интенсивности линий CsII на плато импульса в режимах II—III свидетельствовал о слабом изменении объемной плотности ионов Cs при изменении тока разряда в диапазоне 20—100 А.

В режиме I активированных электродов, благодаря повышенному коэффициенту вторичной ионно-электронной эмиссии [17], напряжение разряда и ионная компонента тока на катод малы. Соответственно понижен коэффициент распыления цезия с электродов, что приводит к увеличению длительности передних фронтов и уменьшению начального уровня сигналов CsI и CsII. Импульсный перегрев поверхности разрядом и выделение цезия с более холодных, нерабочих участков междуэлектродного зазора приводят к увеличению равновесной плотности и накоплению цезия в разряде (рис. 5, 9).

Возрастание плотности электронов и ионов цезия в разряде обуславливает быстрое, квадратичное увеличение амплитуды сигнала CsII при увеличении тока разряда в диапазоне 20—100 А (рис. 8). Слабый рост и насыщение интенсивности линий CsI при токах разряда 50—100 А связаны с увеличением скорости ионизации цезия и уменьшением его плотности, «выгоранием» в межэлектродном зазоре [16].

4.4. Из рис. 5 следует, что в режиме I молибден выбивается из электродов преимущественно в начале газоразрядного импульса. Уменьшение распыления молибдена и выход сигнала MoI на стационарный уровень через 200 мкс после начала импульса объясняются повышением степени покрытия катода цезием вплоть до динамически равновесного значения, определяемого током ионов цезия на катод и коэффициентом распыления цезия.



При увеличении тока разряда в диапазоне 20—40 А стационарный уровень сигнала MoI, благодаря росту плотности электронов в разряде, возрастает (рис. 8). При токах разряда  $\geq 40$  А «блокировка» катода цезием становится более существенной, и интенсивность свечения линий MoI начинает уменьшаться с увеличением тока разряда. Как видно из рис. 8, динамическое покрытие катода цезием в режиме  $I$  растет с увеличением тока разряда.

Установление динамически равновесного цезиевого покрытия катода подтверждается выходом на стационарный уровень напряжения разряда (рис. 5). Флуктуации тока ионов цезия на катод приводят к локальным изменениям цезиевого покрытия и эмиссионной способности катода, что может являться причиной низкочастотных колебаний плотности электронов в разряде и наблюдавшихся флуктуаций интенсивности спектральных линий, и также приводить к разогреву атомов водорода при увеличении тока разряда (рис. 12).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бельченко Ю.И., Димов Г.И. Вопросы атомной науки и техники, серия УТС, 1984, т.8, № 1(14), с.42.
2. Бельченко Ю.И., Деревянкин Г.Е., Димов Г.И., Дудников В.Г. ПМТФ, 1987, № 4, с.106.
3. Моргулис Н.Д., Клапченко В.И. УФЖ, 1976, т.21, № 2, с.181.
4. Бакшт Ф.Г., Иванов В.Г. Письма в ЖТФ, 1986, т.12, № 11, с.672.
5. Grossman M.W. In: Proc. Symp. on the Production and Neutralization of Negative Hydrogen Ions and Beams/Ed. by K. Prelec.—N.Y.: BNL-50727, 1977, p.105.
6. Keller R., Smith H.V. IEEE Trans. Nucl. Sci., 1985, NS-32, N 5, p.1736.
7. Smith H.V., Allison P., Keller R. In: Production and Neutralization of Negative Hydrogen Ions and Beams (Proceedings of IV Intern. Symp., Brookhaven, 1986)/Ed. by J. Alessi: AIP Conf. Proc. N 158.—N.Y., 1987, p.181.
8. Бельченко Ю.И., Димов Г.И., Дудников В.Г. ЖТФ, 1975, т.14, с.68.
9. Alessi J.G., Sluyters Th. Rev. Sci. Instr., 1980, v.51, p.1630.
10. Nightingale M.P.S., Forrest M.J. In: Production and Neutralization of Negative Hydrogen Ions and Beams, (Proceedings of IV Intern. Symp., Brookhaven, 1986)/AIP Conf. Proc. N 158.—N.Y., 1987, p.154.
11. Полякова Г.Н., Ранюк А.И., Ерко В.Ф. ЖЭТФ, 1977, т.73, № 6, с.2131.
12. Грим Г. Спектроскопия плазмы. М.: Атомиздат, 1969, 452 с.
13. Аполонский А.И., Бельченко Ю.И., Димов Г.И., Дудников В.Г. Письма в ЖТФ, 1980, т.6, с.86.
14. Бельченко Ю.И., Димов Г.И., Дудников В.Г., Куприянов А.С. Препринт ИЯФ СО АН СССР 88-14. Новосибирск, 1988, 15 с.
15. Термоэмиссионные преобразователи и низкотемпературная плазма/Под редакцией Б.Я. Мойжеса и Г.Е. Пикуса.—М.: Наука, 1973, 480 с.

16. Бельченко Ю.И., Давыденко В.И., Деревянкин Г.Е. и др. Письма в ЖТФ, 1977, т.3, с.693.
17. Дудников В.Г., Образовский Е.Г., Фиксель Г.И. Физика плазмы, 1978, т.4, с.662.



*В.В. Анциферов, В.В. Бескорвайный, Ю.И. Бельченко,  
Г.Е. Деревянкин, А.М. Максимов, В.Г. Панькин, Л.П. Скрипаль*

**Спектроскопические исследования плазмы  
водородно-цезиевого разряда**

Ответственный за выпуск С.Г.Попов

---

Работа поступила 28 июня 1988 г.  
Подписано в печать 30.08.1988 г. МН 08454  
Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 1,8 печ.л., 1,5 уч.-изд.л.  
Тираж 250 экз. Бесплатно. Заказ № 116

---

*Набрано в автоматизированной системе на базе фото-  
наборного автомата ФА1000 и ЭВМ «Электроника» и  
отпечатано на ротапринтере Института ядерной физики  
СО АН СССР,  
Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.*