

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ ИСТОЧНИКА МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ

А. И. Владимиров, И. И. Кондратьев, В. А. Саенко и Ю. П. Третьяков

Определены параметры плазмы для высокотемпературного режима стационарного отражательного плазменно-пучкового разряда. В качестве рабочего газа использовались водород, гелий, криптон и их смеси.

Ранее было показано, что на основе плазменно-пучкового разряда может быть разработан эффективный источник многозарядных ионов [1, 2], поэтому с целью определения оптимальных условий разряда и места отбора ионов представляет интерес изучение параметров плазмы и выяснение

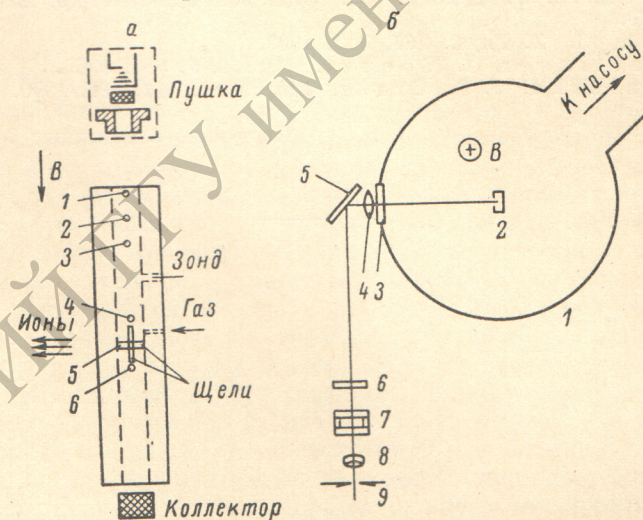


Рис. 1. Экспериментальное устройство и оптическая схема установки.

а (1-6) — эмиссионные отверстия, В — индукция магнитного поля; б: 1 — вакуумная камера, 2 — источник ионов, 3 — смотровое окно, 4 — линза, 5 — поворотное зеркало, 6 — поляризатор, 7 — интерферометр Фабри—Перо, 8 — объектив, 9 — щель спектрографа.

характера пространственного распределения концентрации частиц в разрядной камере в зависимости от условий взаимодействия электронного пучка с плазмой. Наиболее удобными методами диагностики сильно ионизированной плазмы являются бесконтактные методы, в частности оптическая спектроскопия, которая применяется в настоящей работе.

Экспериментальное устройство и методика измерений

Схема использованного экспериментального устройства показана на рис. 1, а. Диаметр инжектируемого электронного пучка 5 мм, разрядный канал представлял собой квадрат сечением 8×8 мм. Исследование про-

странственного распределения оптического излучения по сечению разряда велось через поперечную щель размером 2×8 мм и вдоль разряда через ряд круглых эмиссионных отверстий ($1 \div 6$) диаметром 1 мм в стенке разрядной камеры. Определение параметров плазмы было проведено на продольной щели размером 2×20 мм, находящейся в центральной части разрядного канала. Оптическая схема (рис. 1, б) эксперимента выбиралась в зависимости от характера решаемой задачи. Для исследования продольного относительного распределения частиц изображение плазменного столба разряда проецировалось с помощью сферического зеркала 5 на щель 9 спектрографа, а изображение поперечной щели поворачивалось на 90° системой зеркал 5. Для определения концентрации электронов, температуры ионов и температуры нейтральных атомов использовался интерферометр Фабри—Перо 7 с диэлектрическим покрытием зеркал, который устанавливался в параллельном пучке. Фокусировка изображения интерференционной картины проводилась высококачественным объективом «Юпитер-11» 8 на щель спектрографа ДФС-8 с дифракционной решеткой 600 штр./мм (дисперсия $6 \text{ \AA}/\text{мм}$). Центральная π -компонента исследуемых спектральных линий, испытывающих нормальное зеемановское расщепление, выделялась с помощью поляризатора (6). Регистрация спектров выполнялась на фотопластинках типа «панхром» с дальнейшей обработкой на микрофотометре МФ-2 [3]. Температура электронов оценивалась из измерений абсолютной интенсивности линии гелия He II 4686 \AA с помощью фотоприставки к ДФС-8. Для калибровки применялась ленточная вольфрамовая лампа СИ8-200, которая ставилась на место источника ионов.

Экспериментальные результаты

Определение параметров плазмы проводилось для высокотемпературного режима стационарного отражательного плазменно-пучкового разряда [1]. В качестве рабочего газа использовались водород, гелий, криптон и их смеси.

Температура нейтральных атомов T_a измерялась по полуширине синглетных линий HeI 5016 \AA и HeI 4922 \AA , основной механизм уширения которых определяется эффектом Доплера [4]. Расстояние между зеркальными пластинами интерферометра составляло 8 мм. Значения температур T_a , полученные с помощью измеренных полуширин указанных выше линий в чистом гелии, совпадают между собой и составляют $\sim 600^\circ \text{ K}$, оставаясь практически постоянными при изменении энергии пучка электронов в пределах $0.4 \div 1.6 \text{ кв}$.

Температура ионов T_i оценивалась по полуширине π -компоненты линии азота NII 4630.5 \AA , которая также испытывает нормальное зеемановское расщепление. Результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1
Температура ионов в разряде

$U_k, \text{ кв}$	$I_k, \text{ а}$	Состав газов He : H ₂	$T_i, ^\circ\text{K}$
1.32	0.36	9 : 1	16600
1.16	0.6	2 : 1	25300

Большое различие между температурой ионов и нейтральных атомов может быть связано с тем, что уход ионов на стенки разрядной камеры затруднен из-за наличия сильного продольного магнитного поля.

Основной механизм уширения водородной линии H _{β} определяется эффектом Штарка. При небольшой температуре нейтральных атомов возможно измерение концентрации электронов $n_e \geq 10^{13} \text{ см}^{-3}$ по кривым

$\Delta H_{\beta} = f [I_{\beta} (n_e \cdot 10^{12})]$ работы [4], где исследовалось также действие магнитного поля и было показано, что оно практически не влияет на полуширину линии H_{β} . Последняя измерялась по спектрограммам, полученным при расстоянии между зеркалами интерферометра в 1 мм (при этом влияние магнитного поля не учитывалось). Результаты оценки величины концентрации электронов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Концентрация электронов в разряде

V_k , кв	I_k , а	Состав газов	$n_e \cdot 10^{13}$, см ⁻³
1.2	0.46	H ₂	2.6±0.6
1.32	0.3	H ₂	3.3±0.7
1.16	0.46	He : H ₂ = 4.5 : 1	3.0±0.7
1.0	0.75	Kr : H ₂ = 1 : 6	6.3±0.7

Для определения температуры электронов T_e из измерения интенсивностей спектральных линий необходимо знать механизм заселения и опустошения возбужденных уровней. Модель «мгновенного высвечивания» в плазменно-пучковом разряде по заселенности возбужденных уровней нейтрального гелия по нашим проверкам не подтвердилась, что указывало на наличие $n_e > 10^{12}$ см⁻³. Однако эта модель оправдывается в заселении уровней иона с главными квантовыми числами $n=4 \div 6$ в условиях оптически тонкой плазмы при $n_e < 10^{14}$ см⁻³, которая позволяет оценивать величину T_e по абсолютной

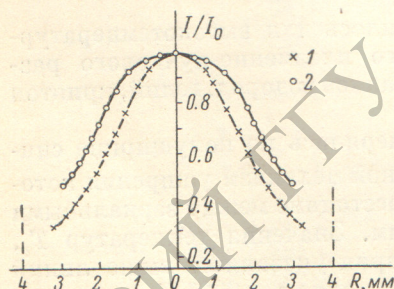


Рис. 2. Радиальное распределение относительных интенсивностей спектральных линий ионов в разряде.

$V_k=1.0$ кв, $I_k=15$ а, $q=0.1$ см³/мин.,
 $V=4.0$ кгс. 1 — ХеII 4296.4 Å, 2 —
 Хе III 4176.5 Å.

интенсивности линии HeII 4686 Å [5]. Измерения проводились в смеси H₂ (18%) и He (82%), при этом $n_e=(3.0 \pm 0.7) \times 10^{13}$ см⁻³ (табл. 2). Количество фотонов с $\lambda=4686$ Å, испускаемое единицей объема плазмы, составляло $\sim 6.6 \cdot 10^{15}$ фот./см³·сек. и было рассчитано из измеренной абсолютной интенсивности линии HeII 4686 Å. Учитывая вклад ионов водорода и примесей азота и кислорода в общую концентрацию заряженных частиц, величина концентрации ионов гелия He⁺ составляет $\sim 2.2 \cdot 10^{13}$ см⁻³. Используя приведенные в [5] оценки вклада различных процессов в заселение и опустошение уровня $n=4$ и необходимые для расчета вероятности спонтанного излучения [6], был составлен баланс количества пришедших на уровень и ушедших с него электронов и определена вероятность возбуждения с основного уровня. На основании теоретической зависимости вероятности возбуждения от T_e [5] в предположении максвелловского распределения величины температуры электронов оценивается нами $T_e=15 \pm 1$ эв.

Температура и концентрация электронов определялись также методом одиночного лентгмюровского зонда. В нашем случае зонд имеет малый диаметр (200 мкм) и ориентирован перпендикулярно магнитному полю (зонд выступает в разрядный канал на глубину 0.5 мм от стенок камеры). T_e измерялась по наклону электронной части зондовой характеристики в полулогарифмическом масштабе и составляла величину $T_e=12$ и 14 эв для мощностей электронного пучка 300 и 670 вт соответственно. Эти значения T_e удовлетворительно согласуются с результатами оптических измерений. Концентрация электронов определялась по ионному току насыщения на зонд и на расстоянии 0.5 мм от стенок камеры составляла величину

$n_e \sim 4.2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ при выбранной усредненной температуре электронов $T_e = 13 \text{ эв}$.

Пространственное распределение относительных интенсивностей спектральных линий ионов ксенона исследовалось в импульсном (длительность импульса 1 мсек., частота повторений 100 гц) отражательном плазменно-пучковом разряде (рис. 2, 3). Результаты усреднялись по фотометрическим данным нескольких измерений. Интенсивность линий нейтральных атомов оказалась недостаточной для фотометрической обработки. По полученным кривым можно судить о распределении концентрации ионов в разрядном

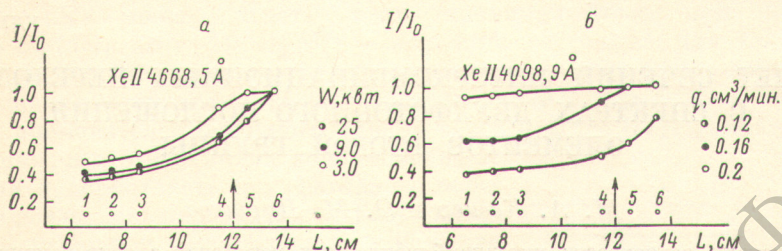


Рис. 3. Продольное распределение относительных интенсивностей спектральных линий ионов в разрядном канале.

а — $q = 0.08 \text{ см}^3/\text{мин}$., б — $V_k = 1.0 \text{ кв}$, $I_k = 15 + 20 \text{ а}$. $B = 4.0 \text{ кгс}$.

промежутке [7]. Из приведенных рисунков видно, что существует как радиальный, так и продольный градиент концентрации ионов. Ход кривых (рис. 2, 3, а) связан с характером взаимодействия электронного пучка с плазмой, в процессе которого происходит ее нагрев [1]. Выравнивание крутизны кривых с увеличением напуска газа (рис. 3, б) вызвано уменьшением градиента давления в пределах разрядного канала.

Таким образом, в настоящей работе определены параметры плазмы отражательного плазменно-пучкового разряда. Введение электронным пучком ($n_e \sim 10^{10} \text{ см}^{-3}$) достаточной мощности ($w > 100 \text{ вт}/\text{см}^3$) в разряд приводит к образованию высокоионизированной, плотной плазмы. Переход к импульсному режиму позволяет существенно увеличивать мощность электронного пучка. Эффективный отбор ионов может быть осуществлен на границе электронного пучка в области подачи газа.

В заключение авторы выражают благодарность Н. П. Романову за помощь в работе.

Литература

- [1] А. И. Владимиров, Е. Д. Воробьев, В. А. Саенко, Ю. П. Третьяков. Препринт ОИЯИ 13-5157, Дубна, 1970; ЖТФ, 41, 5, 1971.
- [2] А. И. Владимиров, В. А. Саенко, Ю. П. Третьяков. Препринт ОИЯИ Р43-5559, Дубна, 1971.
- [3] В. К. Прокофьев. Фотографические методы количественного спектрального анализа металлов и сплавов, ч. II, ГТТИ, М.—Л., 1951.
- [4] Н. П. Романов, А. С. Пасюк. Опт. и спектр., 24, 337, 1968.
- [5] Н. П. Романов. Опт. и спектр., 26, 5, 683, 1969.
- [6] К. У. Аллен. Астрофизические величины, М., 1961.
- [7] И. И. Собельман. Введение в теорию атомных спектров. Физматгиз, М., 1963.

Поступило в Редакцию 17 мая 1971 г.