

СЕТОЧНЫЙ ЭЛЕКТРОД В ПЛАЗМЕННОЙ СТРУЕ

В. И. Баткин, О. Я. Савченко*

Институт химической кинетики и горения СО РАН, 630090 Новосибирск

* Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск

Исследовалось рассеяние протонов плазменной струи полоской, образованной длинными параллельными металлическими нитями. Полоска расположена перпендикулярно струе на расстоянии 70 мм от экстрактора ионов. Результаты эксперимента хорошо описываются моделью пучка невзаимодействующих частиц.

Электрическое поле, создаваемое электродами, помещенными внутри плазменного потока, можно использовать не только для диагностики плазмы [1], но и для управления потоком. Для этого необходимо создать электрическое поле в достаточно большом объеме без разрушения плазмы. С данной целью можно применять сеточные электроды. В настоящей работе экспериментально исследуется действие сеточного электрода на плазменную струю.

Схема эксперимента представлена на рис. 1. Импульсный дуговой генератор плазмы 1 выбрасывает из анодного отверстия плазменную струю. Внутри плазменного потока [2, 3], движущегося слева направо, находится сетка 2 с шагом 0,5 мм, состоящая из десяти прогреваемых вольфрамовых проволок диаметром 30 мкм. На расстоянии 70 мм по ходу движения ионов располагается экстрактор ионов в виде плоского диода из сеток 3, 4. Далее находится анализатор поперечного углового распределения ионов, содержащий перезарядную трубку 5, щелевой коллиматор 6 и проволочный профилометр 7. На анод генератора плазмы подается напряжение +7 кВ, а электроды, имеющие контакт с плазмой, находятся под отрицательным смещением примерно -80 В относительно анода. Смещение сетки 2 относительно анода регулируется. Согласно зондовым измерениям, плотность плазмы вблизи сетки составляла $2,8 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$, температура электронов 2,1 эВ, потенциал плазмы относительно анода источника -30,5 В. Плазменная струя представляет собой направленный поток ионов с кинетической энергией примерно 30 эВ при поперечной температуре меньше 0,1 эВ. Импульсный напуск водорода в разрядную камеру генератора плазмы и в камеру перезарядной мишени при малой задержке поджига дугового разряда (меньше 300 мкс от начала напуска газа) позволяет сохранить в момент измерения в объеме плазменной струи относительно низкое давление (меньше 0,1 Па), когда рассеяние ионов на молекулах газа незначительно.

На рис. 2 изображены линейные профили коллимированного пучка ионов, извлеченных из плазмы. Профиль 1 отображает угловой разброс ионов невозмущенной плазмы, а профиль 2 — результат их рассеяния при смещении сетки -70,5 В или при ее потенциале U относительно плазменной струи -40 В. Для рассеянных ионов коллиматор и профилометр образуют камеру Обскура, в которой угол движения протонов и место их рассеяния в плоскости сетки связаны пропорционально. Провал в центре второго профиля вызван рассеянием протонов нитями сетки, а появление на периферии профиля горбов связано с отклонением частиц краевым полем сетки, в результате которого они попадают в апертуру анализатора. Траектории ионов, рассеянных положительно и отрицательно заряженной сеткой, показаны на рис. 3. В отсутствие экранирования нитей и апертурных ограничений

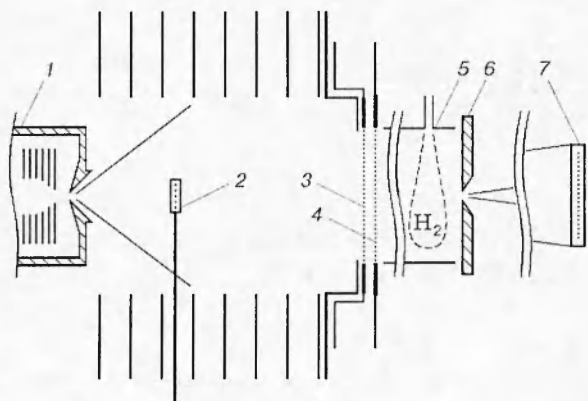


Рис. 1

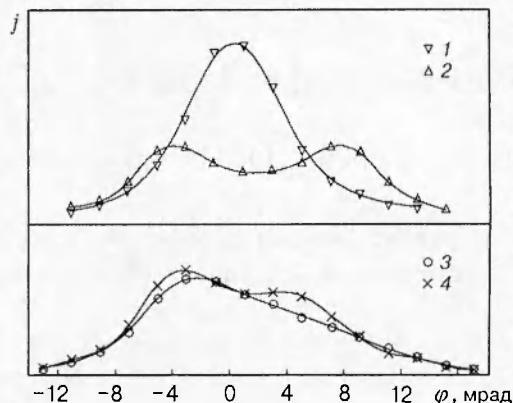


Рис. 2

Рис. 1. Схема проведения эксперимента:

1 — импульсный дуговой генератор плазмы, 2-4 — сетки, 5 — перезарядная трубка, 6 — щелевой коллиматор, 7 — проволочный профилометр

Рис. 2. Линейные профили (1-4) ионов, извлеченных из плазмы при потенциале U , равном 0, -40, +20 и -20 В

рассеяние ионов не зависит от знака потенциала сетки. При потенциалах сетки $U < 20$ В противоположных полярностей профили совпадали. При больших значениях U появляются отличия, характер которых иллюстрируют профили 3 ($U = +20$ В) и 4 ($U = -20$ В) на рис. 2. Отличие профилей связано с зависимым от знака заряда действием краевого поля: либо оно уводит ионы из апертуры анализатора, либо приводит их в нее. Асимметрия профилей связана с положением сетки, смещенным на 1,5 мм от оси.

Для того чтобы дать строгую количественную интерпретацию данных, надо принять во внимание, что в результате внесенного сеткой возмущения плазменная струя теряет свою однородность, и промежуток 70 мм между сеткой и экстрактором нельзя считать свободным от электрического поля. Но при достаточно большом потенциале сетки ($U \gg kT_e/e \approx 2$ В) заметное влияние на движение ионов оказывает в основном крупномасштабное электрическое поле, которое сдвигает спектр поперечных скоростей ионов, но не влияет на его форму. В настоящей работе действие на ионы этого электрического поля не учитывалось. Для анализа экспериментальных данных использовалась модель, в которой сетка рассеивает поток невзаимодействующих ионов с некоторым начальным разбросом поперечных скоростей. Угол рассеяния ионов α определяется в линейном приближении формулой

$$\alpha = \alpha_0(1 - 2x), \quad x \in (0, 1), \quad \alpha_0 = \pi\rho/\sqrt{VV_0}, \quad (1)$$

где x — отношение минимального расстояния иона до нити к шагу нитей сетки, ρ — линейная плотность заряда нитей, eV и eV_0 — выраженная в электрон-вольтах кинетическая энергия ионов в плоскости сетки и вне области ее действия. Степень согласия модели и данных эксперимента иллюстрирует рис. 4. Видно, как с изменением потенциала U меняется ток ионов j , идущих на профилометр вдоль оси (точки 1) и под углом 3,1 мрад к оси (точки 2). Непрерывные кривые рассчитаны по формуле (1) при условии, что исходное распределение поперечных скоростей ионов задается интерполированным профилем 1 (см. рис. 2), плотность заряда ρ пропорциональна потенциалу нитей с коэффициентом $c = 2,9$ пФ/м ($V_0 = 29$ В). Хорошее совпадение модели с экспериментальными данными

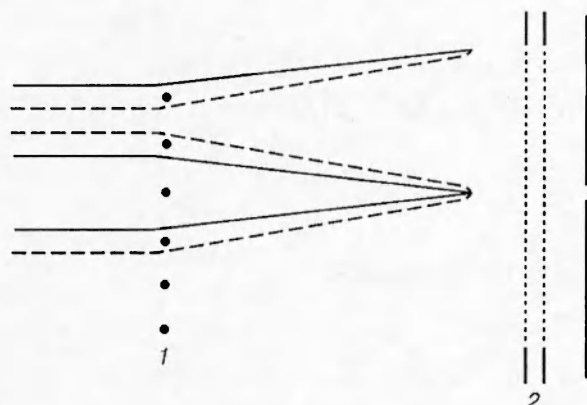


Рис. 3

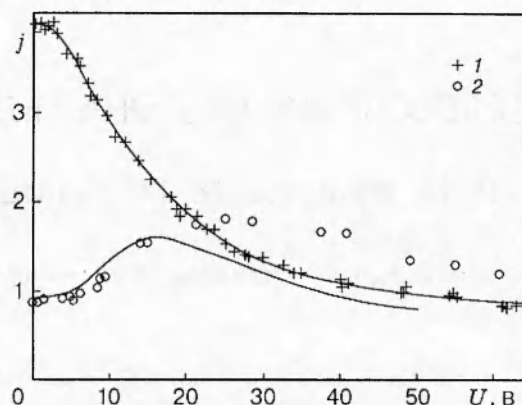


Рис. 4

Рис. 3. Траектории ионов, рассеянных положительно и отрицательно заряженной сеткой 1 (сплошные и штриховые линии соответственно); 2 — экстрактор ионов

Рис. 4. Плотность тока ионов, идущих на профилометр вдоль оси (точки 1) и под углом 3,1 мрад к оси (точки 2), при разных потенциалах на сеточном электроде; линии — результаты расчета

получено в случаях, когда не проявляются апертурные ограничения, связанные с конечным размером сеточного полотна. Расхождение расчетной кривой 2 с экспериментальными точками при $U > 20$ В означает, что данная простая модель не годится для описания рассеяния на краю сетки.

Скорости ионов, извлеченных из плазмы на расстоянии 70 мм от возмущающей плазменную струю сетки шириной 5 мм, хорошо описываются моделью бесстолкновительного разлета ионов. Это означает, что результат столкновений ионов и действие на них коллективных полей малы по сравнению с эффектом рассеивания ионов сеткой. В этих условиях можно воздействовать сеточным электродом на фазовый объем ионного потока и передавать его на значительное расстояние ионами в виде пучка невзаимодействующих частиц.

Работа выполнена при поддержке гранта Минобразования РФ по фундаментальным исследованиям в области ядерной техники и физики пучков ионизирующих излучений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баткин В. И. Модуляция пучка сеточным электродом в экспандере источника ионов // XI Всесоюз. семинар по линейным ускорителям заряженных частиц: Аннот. докл. Харьков, 1989. С. 79.
2. Баткин В. И., Гетманов В. Н., Савченко О. Я., Хусаинов Р. А. Диагностика плазменной струи сеточными электродами // ПМТФ. 1982. № 6. С. 30–36.
3. Баткин В. И. Скорость ионов плазменной струи дугового источника // Журн. техн. физики. 1996. Т. 66, вып. 3. С. 37–42.

Поступила в редакцию 20/XII 1996 г.,
в окончательном варианте — 28/II 1997 г.