

04;10;12

СКОРОСТЬ ИОНОВ ПЛАЗМЕННОЙ СТРУИ ДУГОВОГО ИСТОЧНИКА

© В.И.Баткин

Институт химической кинетики и горения СО РАН,
630090 Новосибирск, Россия
(Поступило в Редакцию 13 декабря 1994 г.)

Исследуются массовые и энергетические спектры плазменной струи импульсного дугового источника ионов. Установлено, что ионы плазменных струй элементов H, He, N, Kг имеют средние кинетические энергии 35–44 эВ, близкие падению потенциала между анодом источника и плазменной струей. Ширина спектра для водорода 10 эВ. Энергия ионов H⁺ регулируется в пределах 31–46 эВ. При токе дугового разряда 80 А ток ионов $\approx 0.5/\sqrt{mA}$, где m — атомный вес иона.

Методы исследования ионных процессов либо основаны на интерпретации характеристик плазмы, содержащей исследуемые ионы, либо используют ионные и молекулярные пучки или ионные ловушки [1]. В первом случае характерно наличие затеняющих факторов, вызванных широким энергетическим спектром ионов, обилием параллельно действующих каналов взаимодействия. Для второго случая характерна низкая интенсивность процессов. Между тем еще в ранних работах по газоразрядным ионным источникам [2,3] было обнаружено, что такие источники создают направленную плазменную струю. Использование плазменных струй в качестве компенсированных ионных пучков для экспериментов на пересекающихся пучках могло бы дать сочетание высокой интенсивности и избирательности. В настоящей работе изучаются характеристики плазменной струи импульсного дугового источника ионов типа [4]. Данный источник в разных модификациях применяется в плазменных исследованиях и ускорительной технике [5,6] для создания пучков протонов интенсивностью от десятков мА до десятков А. Известно [7–9], что плазменная струя этого источника представляет собой бесстолкновительный поток ионов водорода с кинетической энергией десятки эВ и поперечной температурой, падающей до 24 мэВ. В настоящей работе исследуются энергетические спектры и массовый состав плазменных струй ионов H, He, N и Kг.

Эксперименты проводились с модификацией дугового источника ионов, близкой [10], которая создает плазменный поток длительностью порядка 100 мкс с током ионов порядка 1 А. Напук газа составлял

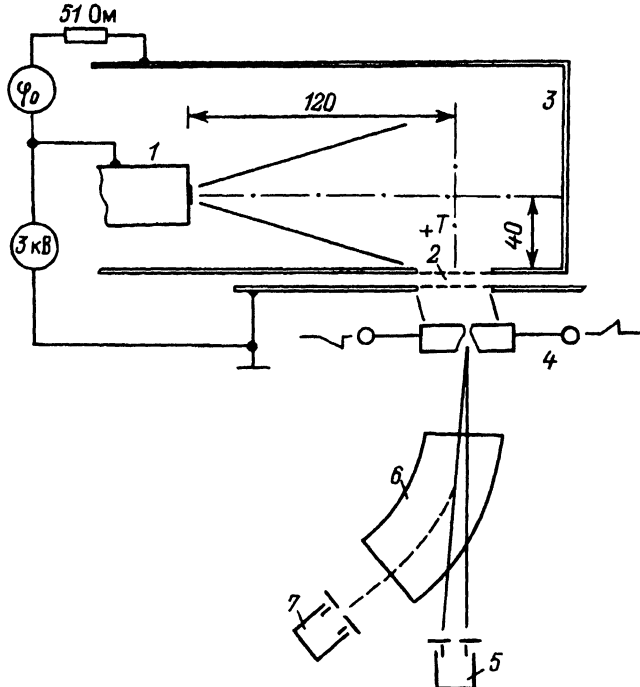


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

$10^{17}/M^{0.5}$, где M — молекулярный вес газа. Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Источник ионов 1 выбрасывает плазменную струю из анодного отверстия формы конуса внутренним диаметром 3 мм, внешним — 11 мм, высотой 8 мм. На расстоянии 40 мм от оси симметрии источника установлен сеточный диод 2, извлекающий ионы из плазмы и ускоряющий их перепадом потенциала 3 кВ. Плоскость сеток ориентирована не в поперечном направлении, как обычно, а в продольном. В этом случае продольная скорость ионов плазменной струи, падающих на диод, переходит в поперечную скорость сформированного диодом пучка ионов. Поперечная скорость пучка определяется компенсационным методом. Из пучка ионов коллиматором 4 вырезается тонкая ленточка, которая отклоняется поперечным электрическим полем вблизи коллиматора и направляется в цилиндр Фарадея 5. Для этого на пластины коллиматора подаются противофазные импульсы отклоняющего напряжения пилообразной формы. По сигналу цилиндра Фарадея определяется спектр поперечных скоростей ионов пучка и, следовательно, распределение ионов плазменной струи по продольной скорости. В промежутке между коллиматором и цилиндром Фарадея установлены поворотный магнит 6 и другой цилиндр Фарадея 7, с помощью которого определялся массовый состав ионов. При выбранном расположении диода извлекается менее 1% потока ионов в плазменной струе, что позволяет уйти от проблемы пространственного заряда пучка. Малое межсеточное расстояние 4 мм при апертуре 50 мм гарантирует отсутствие значительной поперечной составляющей ускоряющего ионы поля.

Для измерения энергетического спектра ионов методом задерживающих потенциалов использовался датчик, содержащий сито прозрачностью 1%, две сетки и коллектор. Датчик устанавливался на оси в 80 мм от анода. Кроме кинетических и массовых характеристик ионов термоэмиссионным зондом определялся объемный потенциал плазменной струи относительно анода. Зонд обычно помещался в точку T . Имелась возможность воздействовать на потенциал плазменной струи, изменяя потенциал на стенках экспандера 3. Для этого стенки 3, соединенные с входной сеткой диода 2, были подключены к аноду 1 через источник смещения φ_0 и сопротивление 50 Ом. Обычно напряжение φ_0 составляло 30 В и потенциал стенок был близок к плавающему.

Для калибровки шкалы поперечных скоростей ионов пучка использовались следующие соображения. Ион с большой продольной скоростью V_z пролетает зазор между отклоняющими пластинами с электрическим полем E и приобретает поперечный импульс

$$P_x \approx \int eE_x dz / V_z = eN / V_z L_y = C\varphi e / \epsilon_0 V_z.$$

Здесь N — поток вектора E между пластинами на участке L_y пластин, однородных в направлении Y , C — погонная емкость пластин вдоль оси Y , φ — разность потенциалов между пластинами. Если приобретенный импульс направляет ион массы m , ускоренный потенциалом U из зазора коллиматора, сдвинутого на X от оси, на цилиндр Фарадея, удаленный на расстояние L вдоль оси, то продольная скорость этого иона в плазменной струе V находится из формулы

$$V\sqrt{m/2e} = C\varphi/2\epsilon_0\sqrt{U} - \sqrt{U}X/L.$$

Величина C определялась по измеряемой проходной емкости между пластинами коллиматора и путем расчета. Совпадение результатов 1%.

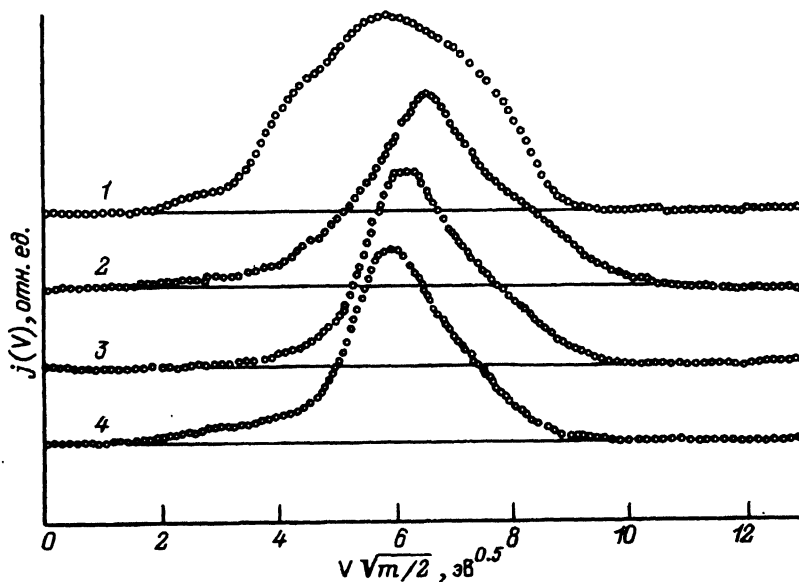


Рис. 2. Спектры скоростей ионов Kr^+ (1), He^+ (2), N^+ (3), H^+ (4).

Элемент	m	Масс-спектр	$I, \text{мА}$	$U_p, \text{В}$	$E_k, \text{эВ}$	$U_d, \text{В}$
H	1	87% H^+ ; H_2^+ , H_3^+	530	34	34.9	67
He	4	95% He^+ ; N^+	250	—	43.6	80
N	14	95% N^+ ; N_2^+	124	38	37.7	70
Kr	83	> 90% Kr^+	40	—	35	45

На рис. 2 приведены спектры продольных скоростей ионов в плазменной струе Kr (1), He (2), N (3), H (4). Для того чтобы спектры были сопоставимы, значения скорости V умножены на $\sqrt{m/2}$. Данные получены при токе дугового разряда около 80 А и близких газовых условиях. В таблице приведены относящиеся к этим случаям характеристики массового спектра ионов, тока I ионов в плазменной струе, потенциала плазмы U_p , кинетической энергии E_k максимума спектра и падения потенциала U_d на дуговом разряде. Потенциал плазмы измерялся в точке T (рис. 1) относительно анода. Обращает внимание слабая зависимость кинетической энергии ионов от рода газа и относительно большая ее величина. Основным фактором, вызывающим ускорение ионов, естественно видеть неуравновешенное давление электронной компоненты. По этому признаку данное устройство является неизотермическим ускорителем плазмы [11]. Если на входе в анодное отверстие температура электронов T_e , то в результате расширения плазменной струи объемное электрическое поле ускорит ионы до энергии $\approx 4T_e$ [12]. Этого недостаточно, чтобы при характерной для данного устройства величине $T_e \approx 5 \text{ эВ}$ [4] объяснить наблюдаемую кинетическую энергию ионов. В то же время близость кинетической энергии ионов и падения потенциала между анодом и плазменной струей свидетельствует в пользу данного механизма ускорения ионов. Условья, в которых ионы ускоряются, обсуждаются ниже. Зависимость скорости ионов от тока дугового разряда в данной работе не исследовалась, но проведенное ранее [4] времяпролетное зондирование плазменной струи не обнаружило зависимости скорости распространения возмущений вдоль струи от тока разряда в пределах 20–150 А.

Почти одинаковый спектр ионов H^+ и N^+ существенно разных масс означает слабое влияние на него ион-электронных столкновений. Аномально широкий спектр Kr^+ можно оправдать тем, что разряд на Kr носил неустойчивый характер: спектр радикально менялся в течение импульса. Временные ограничения, накладываемые системой вакуумной откачки, не позволили оптимизировать режим дугового разряда в данном газе. Для ионов водорода измерение спектра скоростей дублировано измерением распределения ионов по энергии методом задерживающих потенциалов. Максимум спектра энергий +1 В относительно анода, ширина по уровню $1/e$ 10 В. Энергетический разброс ионов на оси плазменной струи оказался заметно меньше разброса энергий периферийных ионов, определенного из спектра рис. 2. Видимо, в периферийную область попадают преимущественно ионы, испытавшие столкновения в основном потоке.

Единственная величина в таблице, которая сильно меняется в зависимости от рода газа, это ток ионов из анодного отверстия I , но I/V , а значит, и плотность плазменной струи, остаются практически

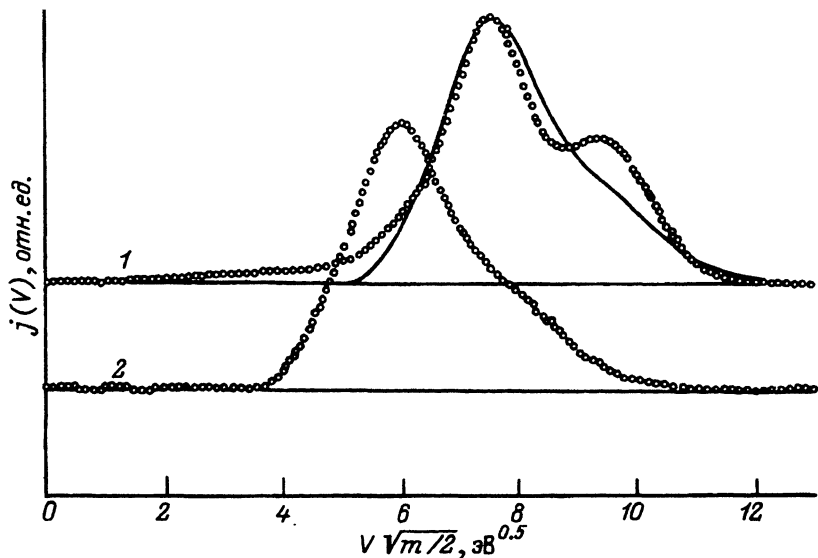


Рис. 3. Спектры скоростей ионов N^+ в аномальном режиме дугового разряда (1) и нормальном режиме (2).

неизменными. Ток I зависит от тока дугового разряда I_d практически линейно: для водорода $I = .003(I_d - 7.4)^{1.2}$ при $20 < I_d < 150$ А.

Особое внимание было уделено факторам, влияющим на скорость ионов. При уменьшении напуска газа в разрядную камеру скорость слабо растет, но разряд теряет устойчивость прежде, чем достигается заметный эффект. Исключение составляет разряд в азоте. При токе разряда 100 А и малом напуске газа наблюдался скачкообразный переход разряда из нормального режима в аномальный режим, сопровождающийся ростом тока ионов в плазменной струе в 2 раза. Одновременно на ≈ 15 В возрастает падение потенциала U_d на разряде, а

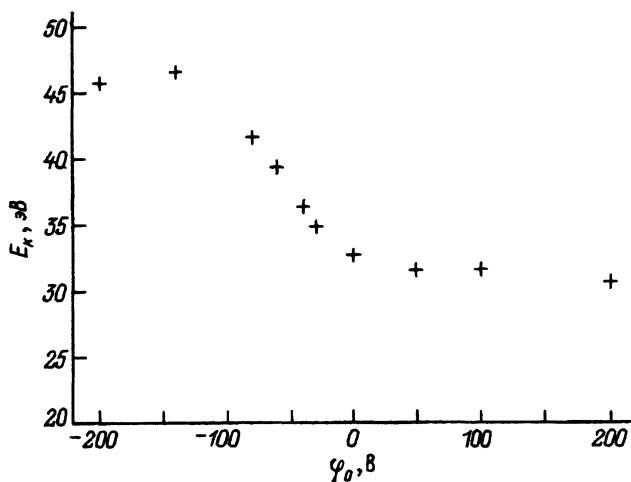


Рис. 4. Зависимость кинетической энергии ионов N^+ от эдс смещения на стенках экспандера.

падение U_p меняется с 38 до 51 В. На рис. 3 даны спектры ионов в аномальном (1) и нормальном (2) режиме. Для наглядности на спектр (1) наложен сдвинутый образ спектра (2). Если деформацию правой части (1) принять результатом развития медленной плазменной неустойчивости, то спектр (1) образуется из ионов спектра (2), приобретших дополнительное ускорение. Вероятно, скачок U_d связан с анодным падением потенциала, которое дополнительно ускоряет электроны и этим увеличивает объемное падение потенциала в плазменной струе. В таком случае ионы образуются после анодного падения. Другим фактором, влияющим на скорость ионов, является смещение на стенках экспандера. Показанная на рис. 4 зависимость кинетической энергии ионов водорода E_k от эдс смещения φ_0 иллюстрирует возможность управления энергией ионов.

В заключение рассмотрим условия, в которых ионы приобретают продольную скорость. Измерения показали, что основное падение потенциала в плазменной струе происходит внутри конического анодного отверстия. Здесь при плотности газа порядка 10^{15} и плотности плазмы порядка 10^{12} плазма является бесстолкновительной. Анод источника не создает границы плазмы, отражающей электроны. В этих условиях возможность стационарного ускорения ионов объемным электрическим полем обусловлена либо турбулентностью плазмы, связанной с наличием ленгмюровских колебаний, либо специфическим спектром электронов $\rho(V) \sim 1/V^2$. Подобное распределение быстрых электронов по скорости можно ожидать в столбе разреженной сильно ионизованной плазмы, когда спектр убегающих из столба электронов лимитируется не сечением рассеяния, а геометрией столба. Однако в данном источнике при выбранных режимах его работы это предположение не выполняется.

Импульсный дуговой источник ионов может служить универсальным средством для создания бесстолкновительных плазменных струй различных ионов с энергией 30–40 эВ. Энергетический спектр ионов достаточно узок, чтобы использовать их в ионных технологиях и после дополнительной сепарации ионов поперечным магнитным полем в исследовательских целях.

Список литературы

- [1] Физика ион-ионных и электрон-ионных столкновений / Под ред. Ф. Бруйара, Дж. МакГоуэна. М.: Мир, 1986. 432 с.
- [2] *Ardenne M.* // *Techn. der Phys.* 1961. Vol. 9. N 5. P. 227–235.
- [3] *Габович М.Д., Романюк Л.И., Лозовая Е.А.* // *ЖТФ.* 1964. Т. 34. Вып. 3. С. 488–495.
- [4] *Димов Г.И., Кононенко Ю.Г., Савченко О.Я.* и др. // *ЖТФ.* 1968. Т. 38. Вып. 6. С. 997–1004.
- [5] *Давыденко Р.И., Морозов И.И., Росляков Г.В.* и др. // *ПТЭ.* 1986. № 6. С. 39–42.
- [6] *Баткин В.И., Гетманов В.Н., Икрянов И.М.* и др. // *ПТЭ.* 1991. № 2. С. 27–31.
- [7] *Баткин В.И., Гетманов В.Н., Савченко О.Я.* и др. // *ПМТФ.* 1982. № 6. С. 30–36.
- [8] *Баткин В.И., Кузарук С.П., Савченко О.Я.* // *ПМТФ.* 1985. № 3. С. 6–8.
- [9] *Баткин В.И., Савченко О.Я.* // *ПМТФ.* 1991. № 1. С. 8–11.
- [10] *Баткин В.И., Гетманов В.Н., Савченко О.Я.* // *ПТЭ.* 1984. № 1. С. 44–49.
- [11] *Морозов А.И.* // *Плазменные ускорители и ионные инжекторы* / Под ред. Н.П. Козлова, А.И. Морозова. М.: Наука, 1984. С. 82–106.
- [12] *Габович М.Д.* Плазменные источники ионов. Киев: Наукова думка, 1964. 224 с.