

# Получение многозарядных ионов аргона, криптона, ксенона и вольфрама из дугового источника на стенде

А. С. ПАСЮК, Ю. П. ТРЕТЬЯКОВ, С. К. ГОРБАЧЕВ

УДК 621.384.611:621.3.032.269.1

Цель настоящей работы — выяснение возможности получения ионов аргона, криптона, ксенона и вольфрама высоких зарядностей в наиболее эффективном источнике многозарядных ионов — циклотронном источнике с подогревным катодом, использующем осциллирующий дуговой разряд [1, 2].

## Методика и условия эксперимента

Исследования проводились на стенде ионных источников Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ [3] (ионы фокусируются после поворота на  $180^\circ$  в однородном магнитном поле). Стенд был реконструирован: заменены вакуумная камера стенда, дуант и механизм перемещения коллектора. Новая вакуумная камера представляет собой два полуцилиндра, уплотненных на верхнем и нижнем полюсных наконечниках электромагнита стенда. Это позволило шиммировать межполюсный зазор и увеличить максимальный диаметр орбиты ионов и диаметр дуанта до 800 мм и тем самым увеличить диапазон изменения отношения массы иона к заряду  $A/Z$ , так как минимальный радиус орбиты остался прежним. В новой конструкции ходовой винт, перемещающий коллектор ионов, находится внутри вакуумной камеры, а двигатель, вращающий винт, и датчики положения коллектора компактно размещены снаружи.

Во время экспериментов напряженность магнитного поля, в котором работал источник и проводился анализ, составляла 4 кэ; напряжение, вытягивающее ионы из разряда и ускоряющее их, было равно 15 кэ. Давление в вакуумной камере стенда составляло  $(1 \div 2) \times 10^{-5}$  торр. В опытах по определению зависимости выхода ионов от расхода газа давление доходило до  $7 \cdot 10^{-5}$  торр. Размер эмиссионной щели источника  $15 \times 1$  мм. Расстояние от эмиссионной щели до электрода, отсасывающего ионы, было равно 6 мм. Источник работал в импульсном режиме. Частота импульсов 100 гц, длительность импульса 1 мсек.

Для получения ионов аргона, криптона и ксенона в источник подавались естественные смеси изотопов соответствующих инертных газов промышленного производства. При получении ионов вольфрама в качестве рабочего газа использовались пары гексафторида вольфрама  $WF_6$ . Изучалась возможность ионизации вольфрама, поступающего в разряд в результате распыления катода и антикатода.

Обсуждение результатов экспериментов

Были измерены зависимости выхода многозарядных ионов от тока, напряжения разряда и количества газа, подаваемого в источник, т. е. параметры, оказывающие наибольшее влияние на выход многозарядных ионов.

Зависимости выхода ионов различных зарядностей от количества рабочего газа, подаваемого в разряд, показаны на рис. 1—3 (стрелками отмечен оптимальный расход газа). По характеру кривые не отличаются от изме-

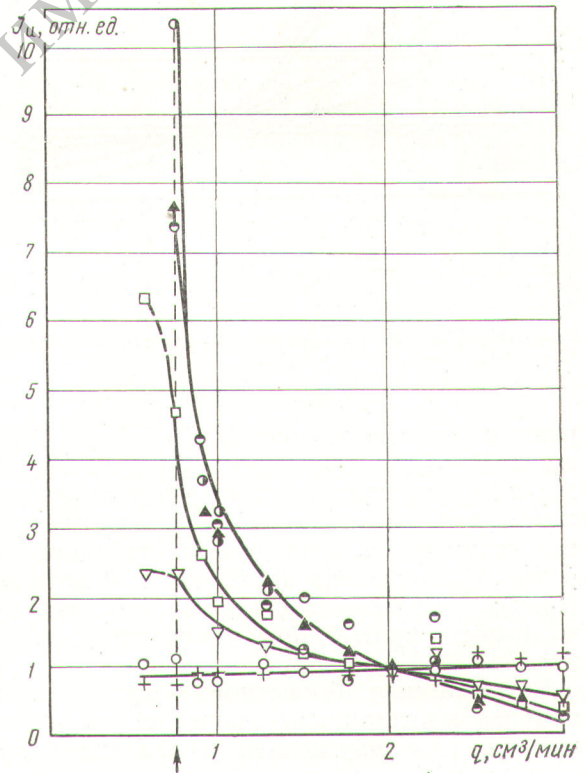


Рис. 1. Зависимость выхода ионов аргона от расхода газа  $q$  (кривые проноормированы к токам при  $q = 2$  см<sup>3</sup>/мин;  $I_D = 12,5$  а;  $U_D = 600$  в):

○ — Ar<sup>7+</sup>; ▲ — Ar<sup>6+</sup>; ● — Ar<sup>5+</sup>; □ — Ar<sup>4+</sup>; ▽ — Ar<sup>3+</sup>; + — Ar<sup>2+</sup>; ○ — Ar<sup>+</sup>.



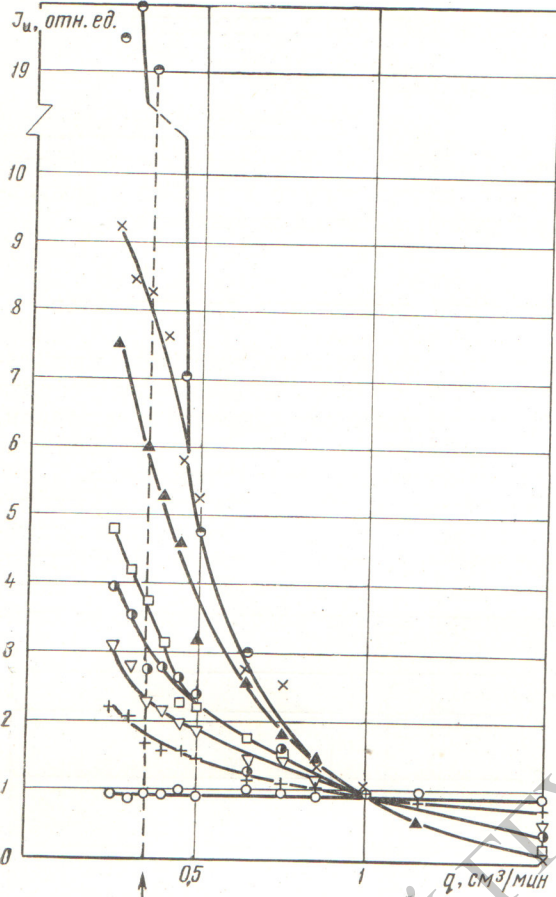


Рис. 2. Зависимость выхода ионов криптона от  $q$  (кривые пронормированы к токам при  $q = 1 \text{ см}^3/\text{мин}$ ;  $I_{\text{д}} = 4,8 \text{ а}$ ;  $U_{\text{д}} = 600 \text{ в}$ ):

○ — Kr<sup>9+</sup>; × — Kr<sup>8+</sup>; ▲ — Kr<sup>7+</sup>; □ — Kr<sup>6+</sup>; ● — Kr<sup>5+</sup>; ▽ — Kr<sup>4+</sup>; + — Kr<sup>3+</sup>; ○ — Kr<sup>2+</sup>.

ренных ранее зависимостей для азота и других газов [1—4], однако при работе на тяжелых газах (аргон, криптон) эти кривые круче и оптимальный расход газа (или минимальный, необходимый для поддержания стабильного горения дуги) меньше по абсолютной величине. Причем чем выше зарядность иона, тем круче подъем кривой при уменьшении расхода газа.

Быстрый спад абсолютного и относительного выходов многозарядных ионов с увеличением расхода газа обусловлен в основном двумя причинами: 1) с увеличением концентрации частиц в разрядной камере понижается температура плазменных электронов, причем это понижение температуры заметнее в случае взаимодействия с тяжелыми многоэлектронны-

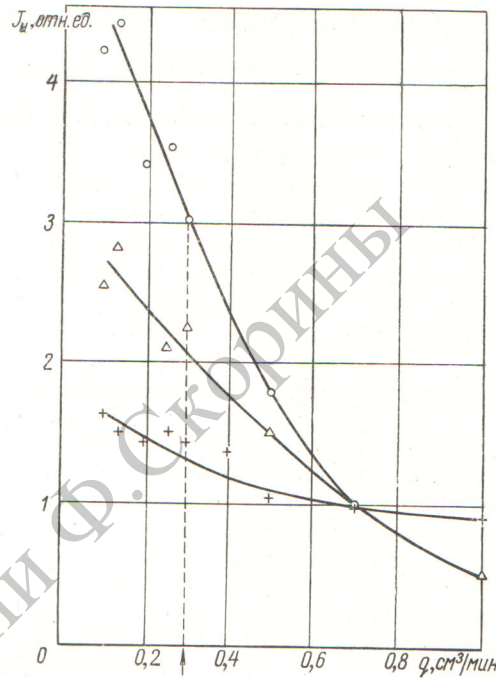


Рис. 3. Зависимость выхода многозарядных ионов ксенона от  $q$  (кривые пронормированы к токам при  $q = 0,7 \text{ см}^3/\text{мин}$ ,  $I_{\text{д}} = 5 \text{ а}$ ;  $U_{\text{д}} = 450 \text{ в}$ ):

○ — Xe<sup>8+</sup>; △ — Xe<sup>6+</sup>; + — Xe<sup>3+</sup>.

ми атомами, так как увеличивается сечение взаимодействия; 2) одновременно с этим уменьшается время между столкновениями иона с нейтральными атомами и ионами низкой зарядности, концентрация которых во много раз превышает концентрацию высокозарядных ионов.

В работе [5] указывается, что уменьшение выхода многозарядных ионов с увеличением расхода газа может быть следствием перераспределения разрядного тока в сторону увеличения ионной составляющей. Меньшая крутизна зависимости выхода многозарядных ионов ксенона от расхода газа объясняется, очевидно, наличием большого количества вольфрама, поступающего в разряд в результате катодного распыления [6]. Абсолютная величина расхода ксенона значительно меньше, чем для более легких газов, поэтому относительное содержание вольфрама значительно и уменьшение подачи ксенона мало изменяет концентрацию всех частиц, участвующих в разряде.

На рис. 4 приведены кривые зависимостей выхода многозарядных ионов криптона от напряжения на дуге, пронормированные к максимальным токам. Видно, что с ростом заряда



иона увеличивается оптимальное для данного заряда значение напряжения на разряде. На рис. 5 показаны кривые зависимостей выхода ионов аргона различных зарядностей от тока дуги. Здесь также заметно увеличение оптимальных значений тока дуги с увеличением заряда иона, хотя и слабее, чем на рис. 4. В случае других газов наблюдаются аналогичные зависимости выхода многозарядных ионов от тока и напряжения, имеющие максимумы выхода ионов. Во время работы источника положение максимума меняется, нет повторяемости и после переборки источника (замены вышедших из строя электродов).

Основной причиной уменьшения тока многозарядных ионов после максимума как при увеличении напряжения, так и при увеличении тока дуги является появление в разряде большого числа распыленных атомов катода и антикатода. Концентрация их растет пропорционально току и квадрату напряжения на дуге [6]. При увеличении мощности дуги увеличивается число частиц в разряде, что приводит к уменьшению выхода многозарядных ионов (см. рис. 1—3).

Рост числа распыленных атомов катода и антикатода с увеличением напряжения дуги хорошо виден из табл. 1, где даны токи ионов

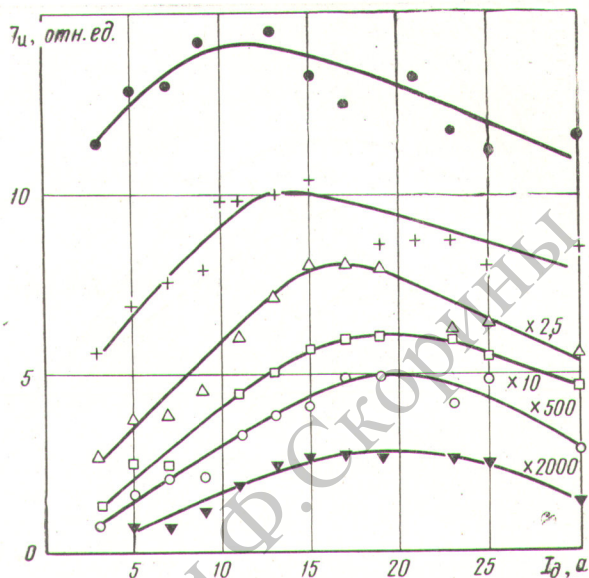


Рис. 5. Зависимость выхода многозарядных ионов аргона от тока дуги ( $U_{д}=550$  в):

● — Ar<sup>3+</sup>; + — Ar<sup>4+</sup>; Δ — Ar<sup>5+</sup>; □ — Ar<sup>6+</sup>; ○ — Ar<sup>7+</sup>; ▼ — Ar<sup>8+</sup>.

вольфрама и ксенона при двух режимах дуги. При этом количество ксенона, подаваемого в разряд, в обоих режимах одинаково.

Сильное уменьшение выхода всех ионов ксенона в режиме с большим напряжением можно объяснить сорбцией атомов ксенона на атомах вольфрама, оседающих на стенках газоразрядной камеры в виде рыхлого пористого слоя. Второй причиной спада интенсивности многозарядных ионов может быть уменьшение элект-

Выход ионов ксенона и вольфрама Таблица 1 при двух режимах дуги (рабочий газ — ксенон)

Параметры дуги		Род иона	Ток иона в импульсе, ма					
$I_{д}, а$	$U_{д}, в$		3	4	5	6	7	8
6	500	Xe W	13	9,8	11	10	7,8	5,7
			Ионов W на порядок меньше, чем Xe					
5	900	Xe W	1,9	0,4 3,4	?* 9,2	?* 10,6	0,14 5,4	— 1,3

\* Большие токи ионов вольфрама не позволили измерить величину тока ионов ксенона.

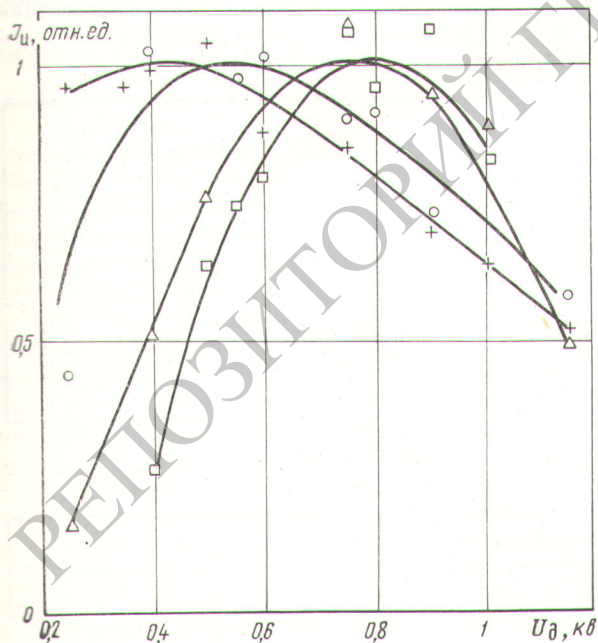
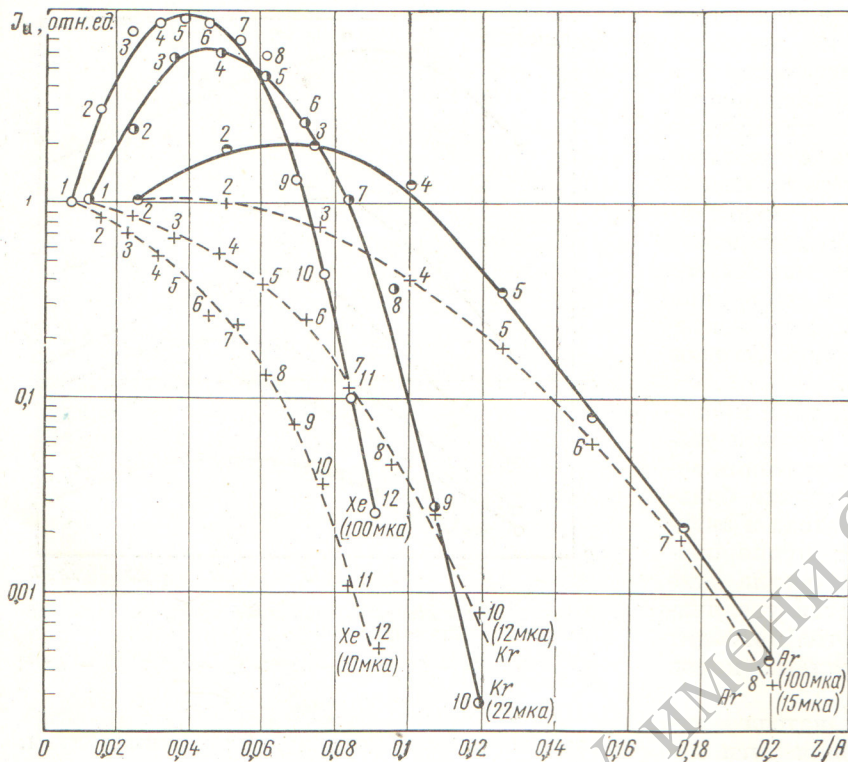


Рис. 4. Зависимость выхода многозарядных ионов криптона от напряжения на дуге ( $I_{д}=5$  а):

□ — Kr<sup>9+</sup>; Δ — Kr<sup>7+</sup>; ○ — Kr<sup>5+</sup>; + — Kr<sup>3+</sup>





Р и с. 6. Относительный выход ионов аргона, криптона и ксенона по зарядности (кривые пронормированы к току однозарядных ионов; цифры на кривых указывают заряд ионов; в скобках — абсолютное значение тока ионов в импульсе для ионов  $Ar^{8+}$ ,  $Kr^{10+}$  и  $Xe^{12+}$ );

— источник с подогревным катодом; - - - источник с холодным катодом.

тронной составляющей тока дуги при увеличении напряжения разряда.

Оптические измерения, проведенные на таком источнике, показали, что температура плазменных электронов понижается с появлением в разряде атомов распыленных электродов [7]. Это также приводит к уменьшению выхода многозарядных ионов.

На рис. 6 показан относительный выход ионов различных зарядностей для аргона, криптона и ксенона, измеренный в режиме, когда выход ионов наивысших зарядностей был наибольшим по абсолютной величине. Для сравнения приведены данные по относительному выходу ионов из источника многозарядных ионов с холодными катодами, взятые из работ

[8] (для аргона) и [9] (для криптона и ксенона). На рисунке приведены токи ионов наивысших зарядностей в импульсе при следующих параметрах дуги разряда:

Тип источника	Исследованный газ	Режим дуги	
		$I_{д}, а$	$U_{д}, кв$
С холодным катодом	Ar	0,9	2,9
	Kr	1,5	2,0
	Xe	1,5	2,0
С подогревным катодом	Ar	6,0	0,95
	Kr	12,7	0,45
	Xe	13,0	0,6

Сравнение токов ионов вольфрама при работе источника на  $WF_6$  и ионизации распыленного вольфрама

Таблица 2

Режим дуги		Рабочий газ	Ток иона вольфрама в импульсе, ма									
$I, а$	$U, в$		4	5	6	7	8	9	10	11	12	
6,5	500	$WF_6$	1,7	3,2	5,9	4,8	2	1,6	0,4	0,27	0,05	
5	900	Xe	3,4	9,2	10,6	5,4	1,3	0,32	0,05	—	—	



В табл. 2 дан ток в импульсе ионов вольфрама различных зарядностей при двух способах подачи вольфрама в разряд: 1) в виде паров  $WF_6$ ; 2) в виде атомов, вылетающих при распылении катода и антикатода. В первом случае суммарный ток ионов фтора в шесть раз превышает ток всех ионов вольфрама.

Для наглядности отметим, что средний ток ионов  $Ar_{40}^{8+}$  из аналогичного источника на циклотроне У-300 ОИЯИ, измеренный на внутреннем пучке на радиусе 100 см, составляет 1—1,5 мка.

Результаты проведенных экспериментов позволяют заключить, что из источника с подогревным катодом можно получить сравнительно большие токи сверхтяжелых ионов высоких зарядностей.

Основной причиной, ограничивающей выход многозарядных ионов из источника при увеличении мощности в дуге, является поступление в разрядную камеру источника частиц материалов электродов, разрушающихся во время разряда (катод и антикатод).

В заключение авторы приносят благодарность Г. Н. Флерову за проявленный интерес к экспериментам и участие в обсуждении

полученных результатов. Авторы благодарят В. П. Ковалева за операторскую помощь на стенде, А. А. Ерошкину за подготовку источников и стенда к работе, Н. П. Романову за помощь в расчетах, а также О. Д. Маслова и В. Я. Выропаева за предоставление соединения  $WF_6$  и установки для подачи его в ионный источник.

Поступила в Редакцию 15/VI 1967 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. П. М. Морозов, Б. Н. Маков, М. С. Иоффе. «Атомная энергия», 2, 272 (1957).
2. А. С. Пасюк и др. «Приборы и техника эксперимента», № 5, 23 (1963).
3. А. С. Пасюк, Го Ци-цян, Ю. П. Третьяков. Препринт ОИЯИ-1523, Дубна, 1964.
4. А. С. Пасюк, Го Ци-цян. «Приборы и техника эксперимента», № 1, 28 (1965).
5. Ю. Д. Пигаров, П. М. Морозов. ЖТФ, XXXI, 476 (1961).
6. А. С. Пасюк, Ю. П. Третьяков, В. Станку. «Приборы и техника эксперимента», № 3, 42 (1965).
7. Н. П. Романов, А. С. Пасюк. Препринт ОИЯИ-7-3090, Дубна, 1966.
8. C. O'nderson, K. Ehlers. Rev. Sci. Instrum., 27, 809 (1956).
9. Q. Ghiorso et al. Препринт URSL-16839, 1966.

## Экспериментальное исследование изменения поперечных размеров электронного пучка в синхротроне на 1,5 Гэв

Ю. А. БЕЛИК, А. А. ВОРОБЬЕВ, А. Н. ДИДЕНКО, А. В. КОЖЕВНИКОВ

УДК 621.384.612

Синхротронное излучение оказывает влияние на бетатронные и синхротронные колебания и может приводить к их возбуждению или затуханию. Так, в синхротронах со слабой фокусировкой на энергию более 1 Гэв квантовый характер излучения может настолько увеличить колебания электронов, что нормальная работа ускорителя станет невозможной. Теория этого вопроса представлена в работах [1—7]. Экспериментально влияние излучения на колебания электронов исследовалось в работах [8—10]. Наиболее удобными являются оптические методы исследования, позволяющие измерять уширение пучка даже в тех случаях, когда количество ускоряемых частиц не уменьшается. Однако пока эти методы использовались только до энергий  $\sim 680$  Мэв. Поскольку действие квантовых флуктуаций излучения быстро растет с энергией, поведение пучка при более высоких энергиях интересно исследовать оптическими методами.

В данной работе приведены результаты экспериментального исследования поперечных колебаний электронов в синхротроне типа рейстрек с максимальной энергией 1,5 Гэв [11]. Слабая фокусировка, сравнительно длительное время ускорения  $T_y = 42$  мсек, рост энергии по синхротронному закону делают этот ускоритель удобным для исследования влияния квантовых флуктуаций синхротронного излучения на колебания электронов. Эксперименты проводились при максимальной энергии 1,2 Гэв. Измерения при более высоких энергиях провести не удалось из-за того, что возникающие при более высоких амплитудах высокочастотного поля механические колебания стенок резонатора приводят к сильному уменьшению интенсивности. Измерение вертикальных и радиальных размеров электронного пучка проводилось оптическим методом, описанным в работе [9]. Съемка поперечного сечения пучка электронов производилась скоростной кинокамерой со скоростью