

С 345 И

Т-666

111-69

Ат.энергия, 1970 г. 286.5, с.423

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна



P7 - 4477

Ю.П.Третьяков, А.С.Пасюк, Л.П.Кулькина,
В.И.Кузнецов

ИСТОЧНИК МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ
С КАТОДНЫМ РАСПЫЛЕНИЕМ РАБОЧЕГО
ВЕЩЕСТВА

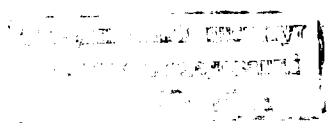
Р7 - 4477

Ю.П.Третьяков, А.С.Пасюк, Л.П.Кулькина,
В.И.Кузнецов

ИСТОЧНИК МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ
С КАТОДНЫМ РАСПЫЛЕНИЕМ РАБОЧЕГО
ВЕЩЕСТВА

Направлено в АЭ

7856/2 чр.



На циклотронах Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ в течение ряда лет эксплуатируется газоразрядный источник многозарядных ионов (м.э.и.) с подогревным катодом ^{/1,2/}, в котором используется дуговой разряд с осциллирующей электронов. Этот источник является самым эффективным из известных источников м.э.и.; в нем были получены 12-зарядные ионы ксенона и вольфрама ^{/3/}. Применение такого источника ограничивается элементами, имеющими газообразные соединения (или соединения с высоким давлением паров) в нормальных условиях.

С целью расширения ассортимента ионов были созданы источники со специальным испарителем твердого вещества, размещенным около газоразрядной камеры. Таков, например, источник ионов лития, разработанный в ИАЭ им. Курчатова ^{/4/}. Температура камеры и паропровода в процессе работы такого источника должна быть выше температуры испарения рабочего вещества, чтобы избежать конденсации паров на стенках камеры и трубопровода.

Все это значительно усложняет конструкцию источника и его эксплуатацию. Кроме того подача паров рабочего вещества в источнике с испарителем может осуществляться только непрерывно. Циклотроны Лаборатории ядерных реакций работают в импульсном режиме, причем паузы между импульсами превышают длительность импульса в 3 - 10 раз.

Так как коэффициент ионизации в источнике м.э.и. высок, то во время рабочего импульса ионы выходят из эмиссионной щели сфокусированным пучком и попадают внутрь дуанта; выхода нейтральных атомов практически нет. В паузах из эмиссионной щели выходят пары и конденсируются на холодных деталях вблизи центра циклотрона. При длительной эксплуатации источника на веществах с малой работой выхода, например, на щелочных и щелочно-земельных металлах это ведет к уменьшению электрической прочности ускоряющего промежутка. Поэтому приходится уменьшать размеры эмиссионной щели. Это позволяет работать длительное время без возникновения пробоев в ч.напряжения ускорителя, но интенсивность пучка ускоренных ионов заметно снижается.

Быстрая регулировка подачи вещества методом испарения затруднительна ввиду значительной теплоемкости испарителя, загруженного рабочим веществом. Это еще один недостаток такого источника, т.к. качество регулировки расхода рабочего вещества оказывает существенное влияние на выход многозарядных ионов ^{/3/}.

Многие химические элементы целесообразно подавать в разряд катодным распылением рабочего вещества ионами плазмы непосредственно в газоразрядной камере. Такой способ подачи иногда применяется в ионных источниках масс-сепараторов и масс-анализаторов ^{/5/}, а также использован в ионном источнике американского линейного ускорителя ^{/6/}. Источник м.э.и. с подачей вещества в разряд методом катодного распыления свободен от ряда недостатков, свойственных источнику с испарителем. При распылении рабочего вещества ионами плазмы оно поступает в газоразрядную камеру только во время разряда, а поэтому из эмиссионной щели источника выходят в основном ионы, которые либо ускоряются, либо оседают внутри дуанта. Электрическая прочность промежутков, находящихся под высокочастотным напряжением циклотрона, в этом случае практически не ухудшается. Как показали исследова-

ния распыления катода, в газоразрядном источнике существует возможность получить достаточную концентрацию атомов распыленного материала при приемлемых токе и энергии ионов, бомбардирующих электрод ^{/7/}.

Конструкция источника и методика измерений

В первых попытках получения многозарядных ионов с помощью катодного распыления рабочие вещества вводились в антикатод и катод газоразрядного источника м.э.и. ^{/3/}. Однако выход многозарядных ионов был мал. Такая конструкция не обеспечивала достаточной концентрации атомов распыленного вещества в месте экстракции ионов из источника ^{/7,9/}. Кроме того, отсутствовала независимая регулировка подачи рабочего вещества.

В разработанном нами источнике эти недостатки устранены.

За основу взята конструкция дугового источника с подогревным катодом и осциллирующей электроном вдоль разряда ^{/1,2/}. В газоразрядную камеру источника против эмиссионной щели введен электрод из распыляемого рабочего вещества, закрепленный на медном держателе, охлаждаемом водой (рис.1).

Питание катода, антикатода и нити источника осуществлялось по обычной схеме питания источника м.э.и. ^{/2/}. Распыляемый электрод был подключен к минусу отдельного регулируемого выпрямителя через балластное сопротивление, которое в сумме с внутренним сопротивлением выпрямителя составляло 90 ом. Максимальное напряжение выпрямителя 3 кв, ток - 2 а. Положительный полюс выпрямителя был заземлен через безиндуктивное сопротивление величиной 10 ом, с которого снимался на осциллограф импульс тока электрода.

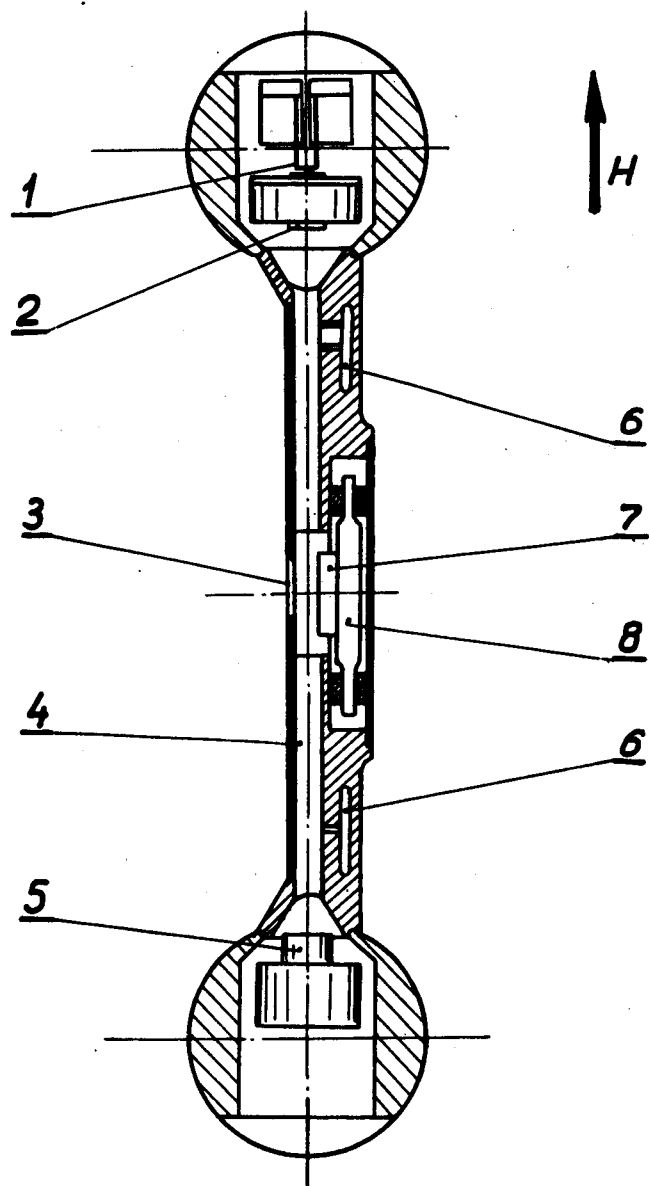


Рис.1. Газоразрядная камера источника многозарядных ионов с катодным распылением рабочего вещества. 1 - нить подогрева катода; 2 - катод; 3 - эмиссионная щель; 4 - газоразрядная камера (анод); 5 - антикатод; 6 - отверстия для подачи газа; 7 - распыляемый электрод; 8 - держатель электрода.

Газ, поддерживающий разряд, в первых опытах подавался в область катода. В дальнейшем была введена дополнительная газовая трубка для подачи газа в область антикатода. Одновременная подача газа в область катода и антикатода приводила к некоторому увеличению выхода м.з.и., хотя ток ионов малых зарядностей не менялся.

Такая конструкция источника имеет следующие преимущества:

В разряд могут быть поданы и тугоплавкие вещества с любой температурой плавления и испарения, не имеющие газообразных соединений. Распыление рабочего вещества ионами плазмы идет только в течение импульса работы источника; в паузах между импульсами электроды не распыляются. Результатом этого являются снижение расхода вещества при большой скважности импульсов и сохранение электрической прочности ускоряющего промежутка.

Автономное питание распыляемого электрода от регулируемого выпрямителя позволяет осуществить точную независимую дозировку поступления в разряд атомов рабочего вещества (рис.5).

Размещение распыляемого электрода в области эмиссионной щели источника и подача вспомогательного газа в область катода и антикатода приводят к локализации рабочего вещества (в виде нейтральных частиц и ионов) в месте извлечения ионов. Ионы газа преимущественно находятся вне области расположения электрода. Благодаря этому получаемый из источника ток ионов рабочего вещества превышает ток ионов вспомогательного газа и составляет 60 - 95% общего тока (см. таблицу 1).

Источник испытан на стенде ионных источников ^{3,8/} и на циклотроне У-300 Лаборатории ядерных реакций. При работе на стенде ионы вытягивались напряжением 15 - 18 кв через эмиссионную щель размером 1 x 15 мм. Разделение ионов по отношению заряда к массе осуществлялось в однородном магнитном поле напряженностью 4 кэ с пово-

Таблица I

Рабочее вещество Z	Ток ионов рабочего вещества по зарядности в импульсе, ма										Сумма токов ионов рабочего вещества, ма	Вспом. газ	Режим источника (в импульсе)			
	1+	2+	3+	4+	5+	6+	7+	8+	9+	ма			% общего тока	U _д	U _{эл}	
12 Mg	18,4	84,9	31,8	3,0	0,4	0,06	0,005				140	Ar	660	7,5	520	2,0
13 Al	22,0	59,1	20,0	3,4	0,25	0,04					105	Xe	300	8,2	980	1,9
20 Ca	3,0	23	22	14	4,5	1,0	0,18	0,035			66	Xe	600	9,5	540	1,8
22 Ti	17,7	32	26,6	12,5	4,7	1,6	0,25 ^x	0,04			95	Ar	400	15,2	930	3,4
29 Cu	29,6	31,7	35,3	26	6,6	1,9					150	Ar	540	10,0	400	2,3
30 Zn	69,6	54,7	29,4	9,49	3,95	0,76	0,20	0,024			168	Xe	400	7,5	560	1,6
42 Mo	24	24,6	23,3	16,8	9,4	2,0	0,4				100	Xe	380	9,5	940	1,8
73 Ta		11,4	18,9	12,5	8,4	3,0					54	Ar	470	9,8	970	1,5
74 W	20	17,1	13,1	6,8	3,3	0,7	0,12	0,12			61	Xe	360	9,0	980	1,4

* Здесь, U_д - напряжение дуги разряда в импульсе,

I_д - разрядный ток в импульсе;

U_{эл} - напряжение на распыляемом электроде во время импульса;

I_{эл} - ток на распыляемый электрод в импульсе.

х) Ток указан приблизительно, точно определено положение пиков I⁺ и N⁺⁺.

ротом пучка на 180°. В этом же поле работал источник. Эмиссионная щель источника на циклотроне имела размер 2,5 x 12,5 мм.

Для определения изменения относительной концентрации атомов и ионов распыляемого вещества в разряде применялся оптический метод; спектрограммы были получены с помощью кварцевого спектрографа ИСП-28. Методика измерений изложена в работе /8/.

Результаты экспериментов

При испытаниях источника напряжение на распыляемый электрод подавалось после установления режима дугового разряда на газе (неон, аргон или ксенон). Род газа выбирался так, чтобы отношение заряда к массе (Z_1/A) его ионов не совпадало по возможности с Z_1/A ионов материала электрода, т.е. не мешало измерять величину токов этих ионов. Используя инертные газы, мы стремились предотвратить образование на поверхности электрода пленки соединения рабочего вещества с вспомогательным газом. В местах образования такой пленки распыление идет значительно медленнее, и это снижает эффективную распыляемую поверхность, к тому же процесс возникновения пленки невозможно контролировать.

Подача напряжения на распыляемый электрод не влияла практически на режим разряда на газе. Увеличение напряжения на электроде приводило к снижению разрядного напряжения, то же наблюдалось, если увеличивать подачу газа в газоразрядный дуговой источник м.э.и. Импульс тока распыляемого электрода так же, как и импульс тока дуги, был близок к прямоугольному, но на этот импульс были наложены высокочастотные колебания.

Вольтамперная характеристика цепи распыляемый электрод-анод при неизменном режиме дуги показана на рис. 2.

Присутствие в разряде материала электрода было видно по изменению цвета разряда. Электрод в ходе работы распылялся в основном по

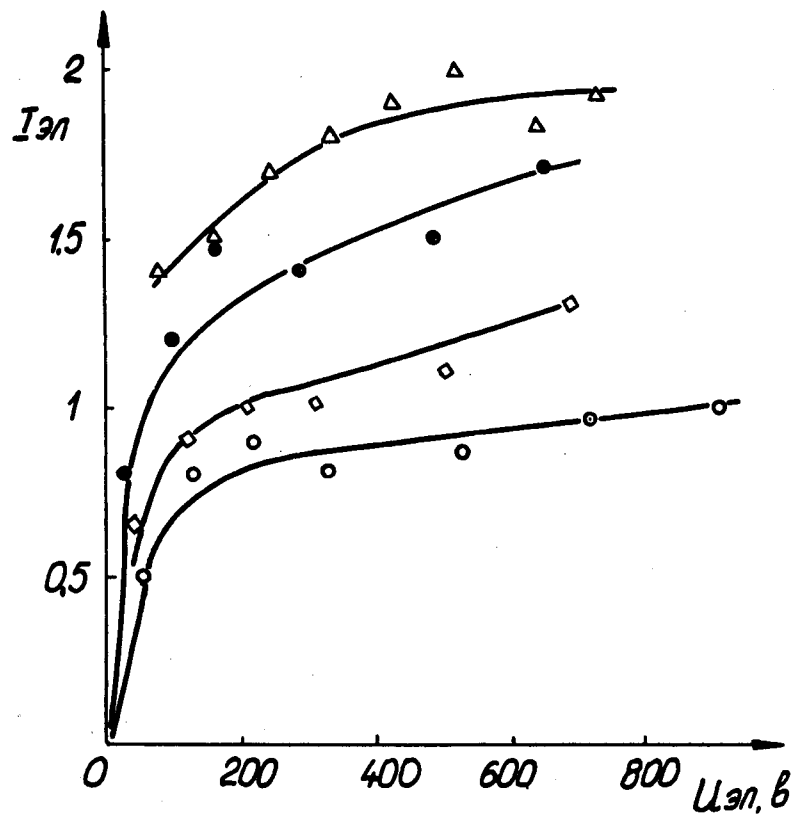


Рис.2. Вольтамперные характеристики промежутка распыляемый электрод-анод

Обозначение	Материал электрода	Ток дуги, а	Напряжение дуги, в
○	Са	5	750
◇	Са	9	700
●	Са	15,5	670
△	Zn	6	600

границы, обращенной к разряду. При этом в первые часы работы один край грани электрода расплылся больше - схематически это показано на рис.3. По-видимому, это следствие ускорения плазмы в скрещенных магнитном и электрическом полях (направление движения плазмы показано на рисунке стрелкой). Перемещение плазмы приводит к увеличению концентрации ионов и, следовательно, плотности ионного тока на край грани электрода, который расплывается быстрее.

По интенсивности линий спектра излучения атомов и ионов распыленного вещества определено относительное изменение концентрации рабочего вещества в разряде с изменением напряжения на электроде (рис.4) и распределение концентрации атомов и ионов в пространстве между электродом и передней стенкой камеры источника (рис.5). В этих опытах расход вспомогательного газа, напряжение и ток дуги оставались постоянными. В таких условиях интенсивность линий будет пропорциональна концентрации соответствующих частиц ^{1/θ}. Из рис.4 видно, что относительная интенсивность линий спектра кальция, меди и цинка почти линейно возрастает с увеличением напряжения на распыляемом электроде. Вылетающие в процессе катодного распыления металлов атомы имеют энергию порядка 10 эв ^{1/10}. Однако, как видно из рис.5, атомы материала электрода ионизируются в начале своего пути в плазме, несмотря на высокую скорость.

На стенде источник был опробован при работе на магнии, алюминии, кальции, титане, меди, цинке, молибдене, тантале и вольфраме. Длительность импульса работы источника составляла 1 мсек, частота импульсов - 100 гц.

Были получены кривые выхода многозарядных ионов в зависимости от параметров разряда в источнике. Зависимости тока некоторых многозарядных ионов от напряжения на распыляемом электроде показаны на рис.6. Ток дуги и напряжение на ней оставались постоянными для дан-

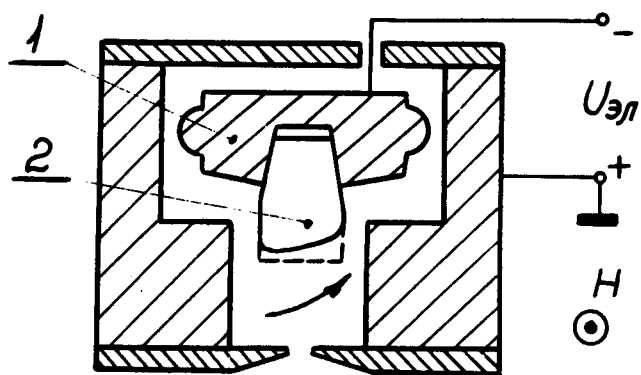


Рис.3. Ход распыления электрода. 1 - охлаждаемый держатель электрода, 2 - распыляемый электрод. Стрелкой показано направление движения плазмы в магнитном поле H .

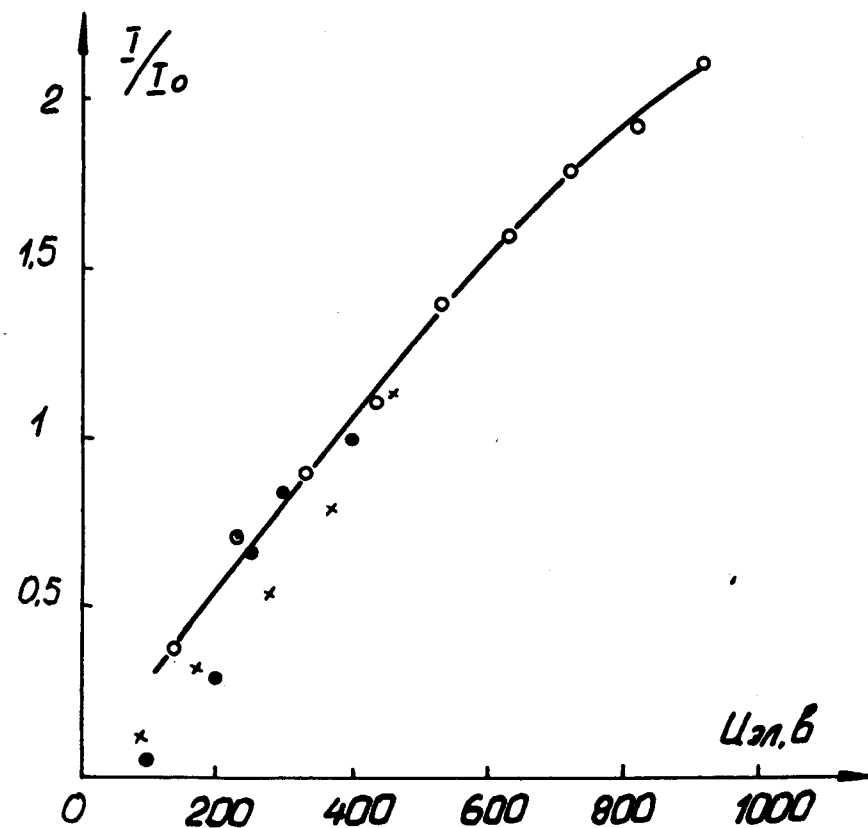


Рис.4. Зависимость относительной интенсивности спектральных линий атомов и ионов распыленных веществ от напряжения на электроде. \circ - интенсивность линий $Cu I$ и $Cu II$; \times - интенсивность линий $Zn I$ и $Zn II$; \bullet - интенсивность линий $Ca II$. Режим разряда: $U_d = 600$ в; $I_d = 5$ а.

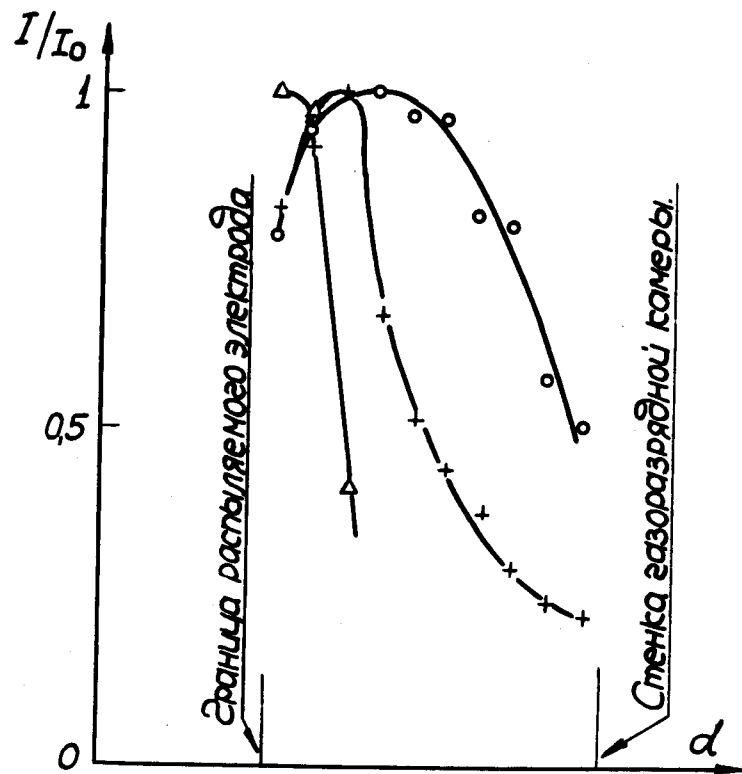


Рис.5. Распределение относительной интенсивности спектральных линий атомов и ионов кальция по поперечному сечению газоразрядной камеры. Δ - CaI, + - CaII; o - CaIII.

ного материала электрода. Изменение концентрации атомов распыляемого вещества так же влияет на выход м.э.и., как и изменение скорости подачи газа в разрядную камеру. Поэтому участки кривых, расположенные справа от максимумов, похожи на зависимости выхода многозарядных ионов от расхода газа ^{/3/}. Положение максимума на кривой определяется расстоянием распыляемой грани электрода от источника и материалом электрода. С удалением по мере распыления грани электрода от плазменного столба максимум смещается вправо. Для обеспечения длительной стабильной работы источника в оптимальных условиях нужно подавать распыляемый электрод в разряд, чтобы расстояние от распыляемой грани до оси источника оставалось оптимальным.

Зависимости выхода м.э.и. меди и цинка от тока и напряжения дуги при неизменных значениях других параметров не отличались по характеру кривых от таких же зависимостей, измеренных при работе источника на газах ^{/3/}, и поэтому не приводятся.

Для оценки возможности получения многозарядных ионов различных элементов с помощью разработанного источника произведены абсолютные измерения токов ионов различной зарядности девяти сильно отличающихся по атомному весу и структуре металлов - от магния до вольфрама. Распыляемые электроды изготовлялись из технических материалов, специальных мер по очистке принято не было. Результаты приведены в таблице 1 (указаны суммарные токи в импульсе всех изотопов исследуемого элемента).

На циклотроне У-300 ускорялись семи- и восьмизарядные ионы кальция. Средний ток ионов Ca_{40}^{7+} на радиусе 100 см был 3 мка, ток ионов Ca_{40}^{8+} - 0,4 мка.

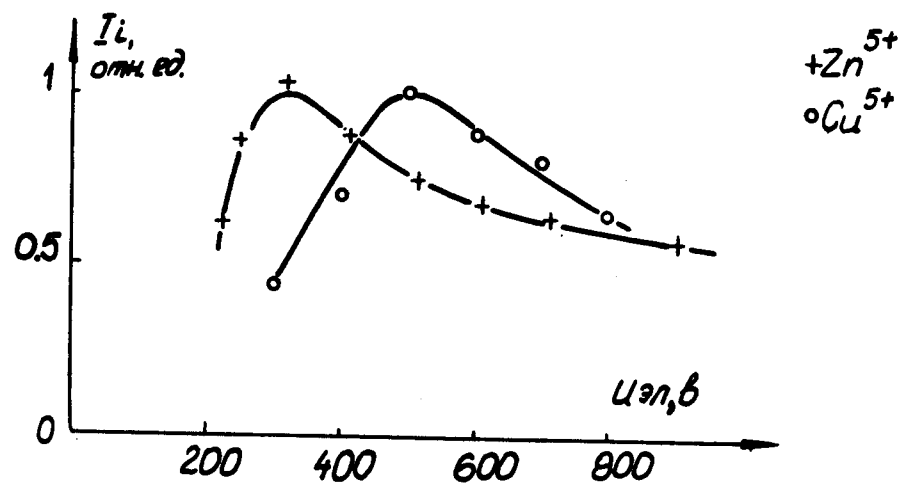


Рис.8. Зависимость тока многозарядных ионов меди и цинка от напряжения на распыляемом электроде. Режим разряда: $U_d = 500$ в; $I_d = 5$ а. х - суммарный ток изотопов Zn^{5+} ; о - суммарный ток изотопов Cu^{5+} .

В ы в о д ы

1. Разработан циклотронный источник многозарядных ионов твердых веществ с подачей рабочего вещества в разряд методом катодного распыления. Конструкция источника позволяет осуществлять импульсную подачу рабочего вещества синхронно с импульсом разрядного тока в область эмиссионной щели источника, причем количество рабочего вещества плавно регулируется. Это обеспечивает высокую эффективность использования рабочего вещества и электрическую прочность ускоряющего промежутка циклотрона.

2. Получены многозарядные ионы магния, алюминия, кальция, титана, меди, цинка, молибдена, тантала и вольфрама.

3. На циклотроне У-300 ускорены семи- и восьмизарядные ионы кальция. Средние токи ионов кальция на радиусе 100 см составили соответственно зарядностям 3 и 0,4 мка.

Авторы благодарят Г.Н. Флерова и Е.Д. Воробьева за постоянное внимание к работе, а также С.Г. Чебоженко за тщательную подготовку источников к испытаниям на стенде и циклотроне м.э.и. ЛЯР.

Л и т е р а т у р а

1. П.М. Морозов, Б.Н. Маков, М.С. Иоффе. Атомная энергия, 2, 272 (1957).
2. А.С. Пасюк, И.А. Шелаев, Го Ци-цзянь, Ю.П. Третьяков, ПТЭ, №5, 23 (1963).
3. А.С. Пасюк, Ю.П. Третьяков, С.К. Горбачев. ПТЭ, №5, 23 (1963).
4. Н.И. Веников, Б.И. Хорошавин, В.И. Чуев, Н.И. Чумаков. Авторское свидетельство СССР, № 197786.
5. Druaux J. and R. Bernas. Electromagnetically enriched isotopes and mass spectrometry. Proceedings of the Conference held in Ccroft Hall, Harwell, 13-16 Sept, 1955, London, Butterworths

- Scientific Publications, 1956, p.30. Hill K.J., Nelson R.S., Nucl. Instr. & Meth., 38, 15 (1965).
6. Gavin B.F., Nucl. Instr. & Meth., 64, 73 (1968).
 7. А.С. Пасюк, Ю.П. Третьяков, В. Станку. ПТЭ, №3, 42 (1965).
 8. А.С. Пасюк, Го Ци-цянь, Ю.П. Третьяков. Препринт ОИЯИ 1523, Дубна, 1963.
 9. Л.П. Кудькина, А.С. Пасюк. ЖТФ, 36, 726 (1966).
 10. G.K.Weohner, R.V.Stuart. in Comptes Rendus de la VI Conference Internationale sur les Phenomenes d'ionisation dans les gaz (Paris, 8-13 Jullet, 1963) v.II, p.49, Paris, 1963.

Рукопись поступила в издательский отдел

8 мая 1969 года.