

С 345 Н

К-95

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА



15/r-78

9 - 11281

В.Б.Кутнер, А.С.Пасюк, Ю.П.Третьяков

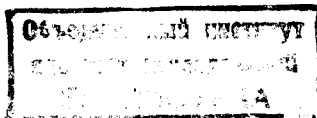
**ИСТОЧНИКИ МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ
С КАТОДНЫМ РАСПЫЛЕНИЕМ ТВЕРДОГО
РАБОЧЕГО ВЕЩЕСТВА**

1978

9 - 11281

В.Б.Кутнер, А.С.Пасюк, Ю.П.Третьяков

ИСТОЧНИКИ МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ
С КАТОДНЫМ РАСПЫЛЕНИЕМ ТВЕРДОГО
РАБОЧЕГО ВЕЩЕСТВА



Кутнер В.Б., Пасюк А.С., Третьяков Ю.П.

9 - 11281

Источники многозарядных ионов с катодным распылением
твердого рабочего вещества

Дан обзор работы источников многозарядных ионов твердых веществ, использующих катодное распыление рабочего материала, на крупнейших ускорителях тяжелых ионов: циклотронах У-300 (Дубна, ОИЯИ), ORIC (Ок-Ридж, США) и линейных ускорителях SuperHILAC (Беркли, США) и UNILAC (Дармштадт, ФРГ). Рассмотрены основные конструкции источников многозарядных ионов с катодным распылением рабочего вещества. Приведены сводные данные выхода многозарядных ионов из циклотронного источника У-300. Сравниваются результаты, полученные на различных ускорителях тяжелых ионов. Показано, что источники с подачей рабочего вещества в разряд методом катодного распыления удобны в эксплуатации и позволяют получать ионы различных веществ, находящихся в твердом состоянии.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1978

Kutner V.B., Pasuyk A.S., Treliakov Ju.P.

9 - 11281

Multicharged Ion Sources with Cathode Sputtering
of Solid Matter

A review of operating of solid matter multicharged ion sources which use matter sputtering in the biggest accelerators of heavy ions (the U-300 cyclotron at JINR, Dubna; ORIC at Oak-Ridge, USA) and in linear accelerators (SUPERHILAC at Berkeley, USA; UNILAC at Darmstadt, BRD) is given. Principal constructions of multicharged ion sources with matter sputtering are considered. Summary data on yields of multicharged ions from the U-300 cyclotron source are presented. The results obtained with various heavy ion accelerators are compared. It is shown that source with the matter feeding to charge by the cathode sputtering are feasible in operation and permit to produce ions of various materials being in a solid state.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Reactions, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1978

В дуговых ионных источниках ионы образуются в газовом разряде. Однако большинство элементов таблицы Менделеева находится в нормальных условиях в твердом состоянии. Для многих задач физики необходимо иметь ионы таких элементов. С этой целью разработаны и эксплуатируются ионные источники с различными способами подачи твердого рабочего вещества в разряд. Одним из таких способов является катодное распыление. Суть его состоит в том, что вещество, ионы которого необходимо получить, наносится на электрод, вводимый в разряд. На этот электрод подается отрицательный потенциал относительно анода. При наличии разряда ускоренные ионы распыляют электрод, частицы его попадают в разряд и ионизуются. Самый простой вариант такого источника - это источник с рабочим веществом, размещенным в антикатоде. Недостатком такого варианта является то, что количество поступающих в разряд частиц зависит от параметров дуги - тока и напряжения. Однако выход многозарядных ионов зависит и от числа поступающих в разряд частиц, и существует оптимальное количество частиц, при котором выход многозарядных ионов наибольший. Поэтому с целью осуществления независимой регулировки подачи числа частиц необходимо ввести в конструкцию ионного источника еще один электрод, с независимой регулировкой потенциала, на который крепится распыляемое вещество.

В настоящее время на ускорителях многозарядных ионов в основном эксплуатируются источники такого типа¹⁻⁴. Они позволяют получать ионы почти всех металлов в широком диапазоне атомных весов, температур

плавления, со значительно отличающимися коэффициентами катодного распыления и другими физическими свойствами. Различие в свойствах металлов требует разработки определенных методик изготовления распыляемых электродов.

С целью экономичного расхода материалов электрода анод газоразрядной камеры может быть выполнен не охлаждаемым ^{5/}. Это целесообразно для тех веществ, у которых упругость пара при рабочей температуре камеры /1000-1500° С/ достаточно высокая.

Рассмотрим основные существующие конструкции источников многозарядных ионов с катодным распылением рабочего вещества.

В Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ разработан и эксплуатируется ионный источник такого типа ^{1/} /см. рис. 1/. Подача материала в этом источнике осуществляется путем катодного распыления образца, который вводится в разряд через отверстие в аноде. Образец крепится на медном, охлаждаемом водой, держателе. На него подается регулируемый отрицательный относительно анода потенциал. Во время работы вещество электрода расходуется, а материал катода и антикатада оседает на стенках камеры и сужает ее в верхней и нижней частях. Это ограничивает поперечные размеры первичного электронного пучка и отодвигает границу первичной плазмы от стенок разрядной камеры. Поэтому в конструкции источника предусмотрена возможность перемещения электрода.

Источник исследовался на стенде и уже несколько лет эксплуатируется на циклотроне У-300 ОИЯИ. На стенде источник работал в магнитных полях от 3,5 до 6 кГс. Ионы извлекались из эмиссионной щели размером 1 x 15 мм с помощью вытягивающего электрода под напряжением 17-26 кВ. Длительность импульсов разряда - 1 мс, частота повторения импульсов - 100 Гц. В качестве вспомогательного газа использовались ксенон или аргон. Это связано с тем, что, во-первых, инертные газы не образуют химических соединений на поверхности электродов и, во-вторых, они имеют более высокий коэффициент катодного распыления.

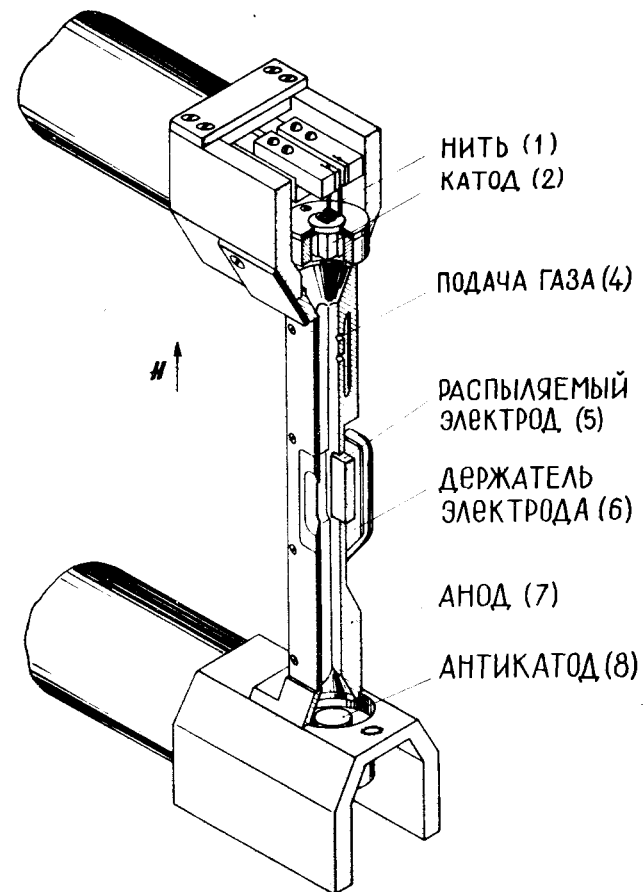


Рис. 1. Источник с катодным распылением рабочего вещества для циклотрона У-300.

В табл. 1 приведены результаты, полученные при исследованиях на стенде: режимы разряда, среднее напряжение на распыляемом электроде ($U_{эл}$) и импульсный ток, приходящий на распыляемый электрод ($I_{эл}$). Доля тока ионов распыляемого вещества в полном ионном токе, полученном из эмиссионной щели источника, составляла от 40 до 90%.

Таблица I
Выход ионов металлов из источника в стендовых
испытаниях

| Ионы-элементы | Режим дуговой дуги | | Ток ионов рабочего вещества в амперы, мкА | | | | | | | | | | | | | | | | Ионный ток монохромного вещества, мкА | | Условная выдержка, сек | | | | |
|---------------|--------------------|-----------|---|------|----|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|----|---------------------------------------|----|------------------------|------|------|-----|------|
| | длина дуги | сила тока | 1+ | 2+ | 3+ | 4+ | 5+ | 6+ | 7+ | 8+ | 9+ | 10+ | 11+ | 12+ | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | | 19 | 20 | 21 | 22 |
| 12 Mg | 600 | 7,5 | 520 | 2 | Ar | 18,4 | 84,9 | 31,8 | 3,0 | 0,4 | 0,05 | 0,005 | | | | | | | | | | 140 | 77 | 3,6 | 15 |
| 13 Al | 500 | 8,2 | 980 | 1,9 | Ar | 22 | 59,1 | 20 | 3,4 | 0,25 | 0,04 | | | | | | | | | | | 105 | 100 | 3,6 | 15 |
| 14 Si | 620 | 11 | 1900 | 2,5 | Ar | 12,1 | 45,6 | 34,9 | 12,8 | 1,6 | 0,18 | 0,018 | | | | | | | | | | 104 | 80 | 3,6 | 24 |
| 20 Ca | 600 | 9,5 | 540 | 1,8 | Ar | 3,0 | 23 | 22 | 14 | 4,5 | 1,0 | 0,18 | 0,035 | | | | | | | | | 66 | 60 | 3,6 | 15 |
| 21 Sr | 500 | 8 | 1700 | 0,64 | Ar | 1,3 | 18 | 19 | 4,9 | 0,80 | 0,051 | 0,009 | | | | | | | | | | 44,5 | 74 | 3,6 | 17 |
| 22 Ti | 750 | 15 | 1250 | 2,4 | Ar | 2,1 | 8,5 | 13,6 | 13,4 | 8,7 | 1,1 | 0,33 | 0,035 | | | | | | | | | 43 | 43 | 4,4 | 22 |
| 23 V | 900 | 15 | 1400 | 1,6 | Ar | 6,3 | 19 | 12 | 14 | 5,4 | 1,1 | 0,15 | 0,029 | | | | | | | | | 59 | 74 | 4,4 | 21 |
| 24 Cr | 1200 | 15 | 850 | 1,0 | Ar | 3,7 | 10,8 | 5,2 | 10,3 | 8,8 | 3,3 | 0,55 | 0,059 | 0,002 | | | | | | | | 43 | 65 | 4,4 | 22 |
| 25 Mn | 650 | 8,5 | 800 | 0,7 | Ar | 5 | 16 | 18 | 11,3 | 6,1 | 1,6 | 0,39 | 0,09 | 0,026 | 0,001 | | | | | | | 56 | 83 | 4,4 | 20 |
| 26 Fe | 480 | 13 | 600 | 1,6 | Ar | 3 | 12,6 | 14 | 6,4 | 1,7 | 0,33 | 0,12 | 0,04 | 0,004 | | | | | | | | 38 | 76 | 5,3 | 25 |
| 27 Co | 500 | 15 | 790 | 1,3 | Ar | 12,5 | 19 | 15 | 10 | 2,5 | 0,53 | 0,055 | 0,01 | 0,002 | | | | | | | | 59 | 70 | 3,6 | 28 |
| 28 Ni | 620 | 9,5 | 700 | 1,6 | Ar | 8,5 | 15,5 | 10,3 | 4,9 | 2,4 | 1,1 | 0,14 | 0,01 | | | | | | | | | 42 | 47,5 | 3,6 | 22 |
| 29 Cu | 540 | 10,0 | 400 | 2,3 | Ar | - | 29,6 | 31,7 | 35,3 | 23 | 5,6 | 1,9 | | | | | | | | | | 150 | 70 | 3,6 | 15 |
| 30 Zn | 400 | 7,5 | 560 | 1,6 | Ar | - | 69,6 | 54,7 | 29,3 | 3,5 | 3,95 | 0,76 | 0,2 | 0,024 | | | | | | | | 170 | 36 | 3,6 | 18 |
| 32 Yb | 900 | 5,5 | 2000 | 0,5 | Ar | 8,4 | 16,8 | 9,5 | 11,1 | 3,4 | 1,35 | 0,48 | 0,09 | | | | | | | | | 54 | 77 | 3,6 | 20 |
| 41 Nb | 700 | 20 | 880 | 1,5 | Ar | 0,7 | 4,8 | 6,8 | 11 | 17,8 | 3,8 | 1,1 | 0,33 | 0,044 | 0,004 | | | | | | | 29 | 45 | 4,4 | 24 |
| 42 Mo | 380 | 9,5 | 940 | 1,8 | Ar | - | 24,0 | 24,6 | 23,3 | 16,6 | 9,4 | 2,0 | 0,4 | | | | | | | | | 100 | 90 | 3,6 | 15 |
| 43 In | 900 | 10 | 200 | 1,0 | Ar | - | 14 | 17,6 | 27,7 | 37,5 | 21,9 | 11,3 | 3,1 | 0,74 | 0,11 | 0,025 | | | | | | 146 | 90 | 4,4 | 20,5 |
| 49 Sn | 540 | 11,5 | 1250 | 0,85 | Ar | - | 1,7 | 3,3 | 6,4 | 7,4 | 4,4 | 3,2 | 1,2 | 1,0 | 0,33 | 0,018 | | | | | | 29 | 65 | 5,3 | 26 |
| 50 Pb | 840 | 14,5 | 550 | 0,75 | Ar | - | 1,6 | 2,6 | 3,5 | 2,9 | 3,0 | 3,7 | 1,3 | 0,15 | | | | | | | | 18 | 40 | 4,4 | 22 |
| 57 La | 760 | 11 | 850 | 1,1 | Ar | - | 8,5 | 7,7 | 7,9 | 5,5 | 5,0 | 3,3 | 2 | 0,9 | 0,042 | | | | | | | 57 | 57 | 4,4 | 20 |
| 73 Te | 470 | 9,8 | 970 | 1,5 | Ar | - | - | 11,4 | 18,9 | 12,5 | 8,4 | 3,0 | 0,7 | 0,12 | | | | | | | | 54 | 65 | 3,6 | 15 |
| 74 U | 360 | 3,0 | 980 | 1,4 | Ar | - | 20 | 17,1 | 13,1 | 6,8 | 3,3 | 0,9 | 0,12 | | | | | | | | | 61 | 65 | 3,6 | 15 |
| 75 As | 580 | 20 | 540 | 2,8 | Ar | - | 14,9 | 13,7 | 12,4 | 14,5 | 8,6 | 3 | 0,9 | 0,6 | | | | | | | | 86 | 36 | 5,7 | 18 |
| 83 Br | 860 | 8,5 | 480 | 0,5 | Ar | - | - | 2,4 | 2,8 | 5,6 | 6,3 | 4,2 | 2,4 | 1,2 | 0,91 | 0,22 | 0,03 | | | | | 30 | 30 | 3,6 | 17 |

Примечание: Величины токов приближительны; точному определению мешают пики N⁺ и Ar³⁺.

На циклотроне У-300 на основной частоте ускоряющего напряжения ускорялись ионы магния, алюминия, кальция, скандия, титана, ванадия, хрома, марганца, железа, никеля и германия. На 3-й гармонике ускорялись ионы железа, никеля, германия, ниобия, лантана и висмута. Время работы источников - от 12 до 25 час, расход материала электрода составлял от 40 до 100 мг/час.

Аналогичная конструкция ионного источника была разработана для западногерманского ускорителя многозарядных ионов UNILAC^{1/2}. Из рис. 2 ясно его устройство. Источник такого типа был испытан на стенде.

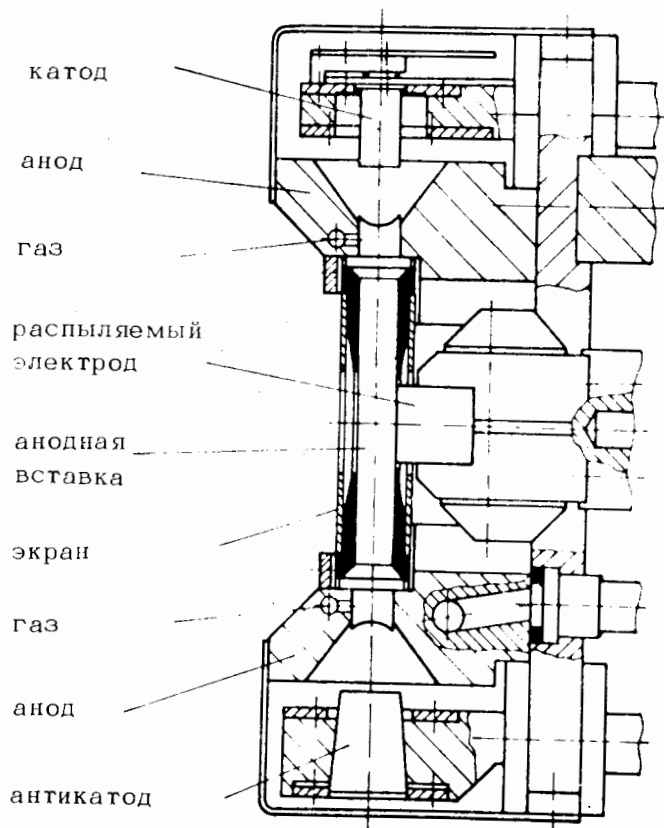


Рис. 2. Источник с катодным распылением рабочего вещества для UNILAC^{1/2}.

Эмиссионная щель имела размеры 0,5 x 20 мм, магнитное поле, в котором работал источник, и анализирующее поле - - 9 кГс, ускоряющее напряжение - до 20 кВ. В качестве вспомогательного газа использовался аргон. Источник работал как в импульсном режиме /длительность импульса 5 мс, частота 50 Гц/, так и в постоянном. В табл. 2 приведены результаты, полученные на стенде.

Для калифорнийского ускорителя SuperNILAC разработан источник многозарядных ионов с катодным распылением рабочего вещества на базе источника типа Пеннинга с холодными катодами^{/3/}. На рис. 3 представлены источники с двумя вариантами распыляемого электрода: в виде трубочки, расположенной в центре камеры, и в виде колец, расположенных по обоим концам эмиссионной щели. Автор указывает, что для получения высокозарядных ионов предпочтительнее конструкция с кольцевой формой электродов, с точки зрения достижения оптимального режима. Так, выход ионов золота был примерно в три раза больше, чем при традиционном размещении распыляемого электрода на уровне эмиссионной щели. С помощью такого источника получены токи: 1 мкА ионов Au¹¹⁺ и 8 мкА ионов Au¹⁰⁺. Источник работал в импульсном режиме при токе разряда от 1,5 до 3,5 А и напряжении около 1100 В.

На ускорителе UNILAC для получения многозарядных ионов газов используется дуоплазматрон. В конструкцию дуоплазматрона внесены изменения^{/4/} с той целью, чтобы в нем можно было получать многозарядные ионы из твердых веществ. Из рис. 4 видно, что дополнительный электрод для распыления желаемого металла размещен между анодом и промежуточным электродом. Источник такого типа испытывался на стенде, где были получены ионы Ca, Ti, V, Cr, Fe, Ni, Cu, Zn, Mo, Ta. В стендовых испытаниях получен средний ток ионов ⁵⁸Ni³⁺ в 2 мкА. Проведены некоторые опыты на инжекторе ускорителя, где получен средний ток ионов ⁵⁸Ni³⁺ в 1 мкА и ионов ⁴⁸Ti³⁺ в 2,5 мкА.

При работе источника многозарядных ионов в циклотроне наблюдается явление катодного распыления эмиссионной щели и противоположной стенки газоразрядной

Таблица 2
Выход ионов металлов из источника ионов для ускорителя UNILAC^{/2/}

| Рабочее вещ- во | Режим дуги U _д , В I _д , А | Ток ионов в импульсе, мкА | | | | | | | | | | % ио- нов метал- ла | | | | |
|-----------------------|---|---------------------------|-----|-----|-----|----|------|----|----|----|-----|------------------------------|-----|--|--|----|
| | | I+ | 2+ | 3+ | 4+ | 5+ | 6+ | 7+ | 8+ | 9+ | 10+ | | 11+ | | | |
| Tl | 520 5 пост. | - | 280 | 290 | 270 | 80 | | | | | | | | | | 80 |
| ⁶⁵ Cu | 380 4 пост. | - | 90 | 80 | 65 | 15 | 2 | | | | | | | | | 75 |
| ⁶³ Cu | | | 220 | 190 | 155 | 40 | 5 | | | | | | | | | |
| ¹²⁰ Sn | 360 3 пост. | - | - | - | 60 | 25 | - | | | | | | | | | |
| Au | 490 6 пост. | - | - | - | - | 15 | 12,5 | 8 | 3 | | | | | | | 15 |
| Pb | 400 9,6 имп. | - | - | - | 30 | 60 | 80 | 60 | 33 | 10 | | | | | | 25 |
| B1 | 300 10 имп. | - | - | - | - | 21 | 36 | 33 | 21 | 8 | 4 | | | | | 15 |
| U | 460 6,5 пост. | - | - | - | - | - | - | 26 | 30 | 24 | 15 | 4 | | | | 10 |

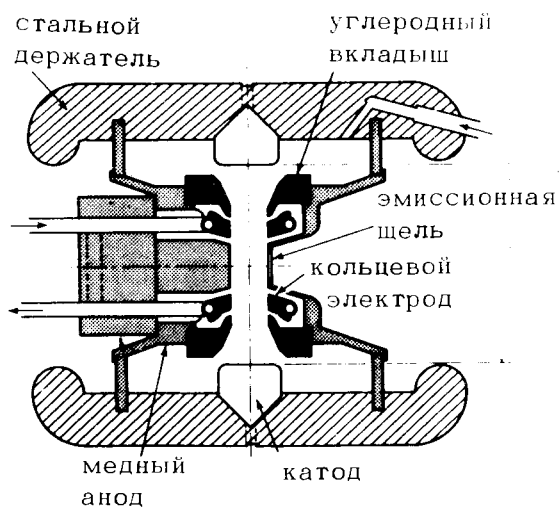
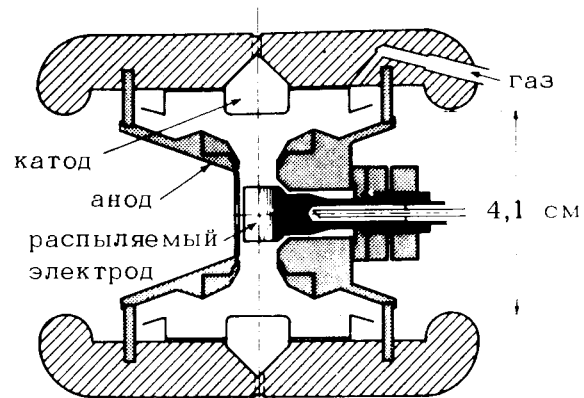


Рис. 3. Источник с катодным распылением рабочего вещества для SuperHILAC'a.

камеры. Происходит это за счет того, что ионы, извлеченные из источника и не успевшие уйти в дуант до изменения полярности потенциала на дуанте, тормозятся и двигаются в сторону источника. Они-то и разрушают эмиссионную щель и стенки газоразрядной камеры.

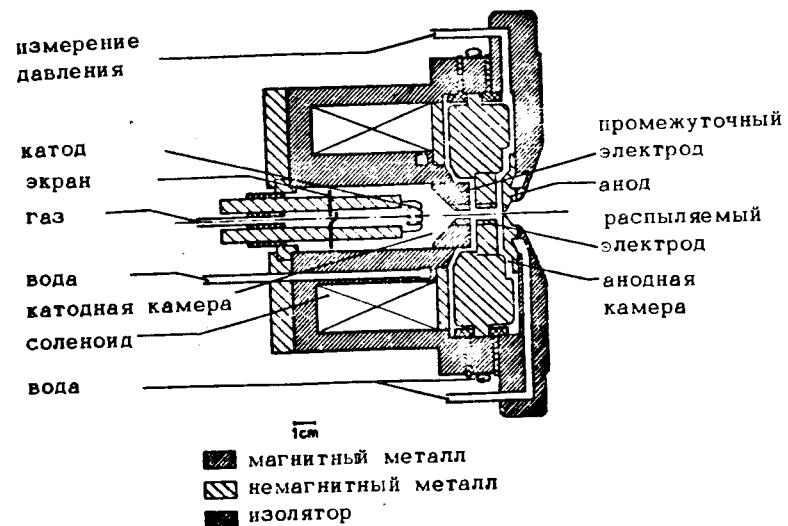


Рис. 4. Дуоплазмотрон с катодным распылением рабочего вещества.

В работе /6/ этот факт используется для подачи в разряд твердых материалов: в то место, где происходит наибольшее распыление внутренней стенки газоразрядной камеры, помещается материал, ионы которого желательнее ускорить. Это хорошо видно из рис. 5. Этим способом получены и ускорены на окриджемском изохронном циклотроне ионы Li, B, Mg, Al, Si, Ca, Ti, Fe, Ni, Cu, Zn, Nb.

Таким образом, мы видим, что источники с подачей рабочего вещества в разряд с помощью катодного распыления удобны в эксплуатации и позволяют получать ионы различных веществ, находящихся в твердом состоянии. Следует заметить, что интенсивность пучка высокозарядных ионов при катодном распылении в 2-3 раза ниже, чем при подаче этого же вещества в виде пара, так как в последнем случае нет необходимости подачи в разряд вспомогательного газа.

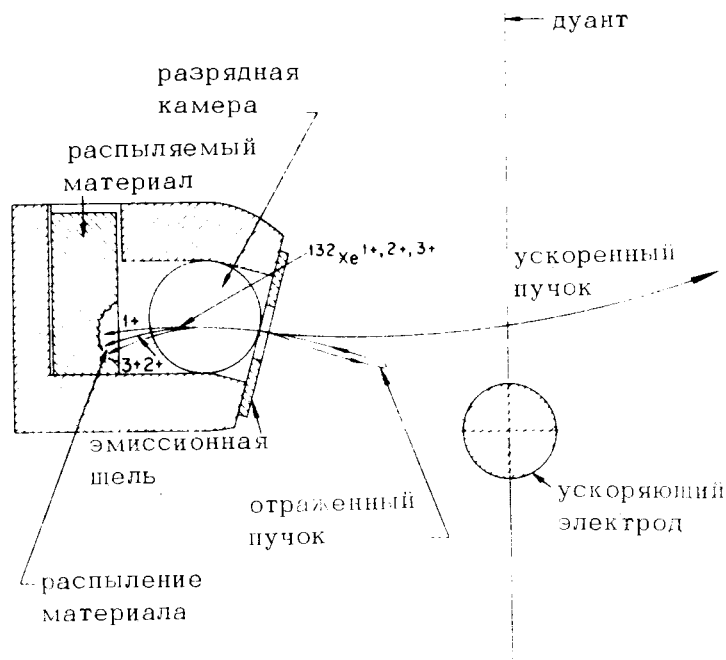


Рис. 5. Сечение центра циклотрона /показаны расчетные траектории ионов ксенона, повернутых в сторону источника/.

В заключение авторы выражают благодарность академику Г.Н.Флерову за постоянное внимание к работе с ионными источниками.

ЛИТЕРАТУРА

1. Pasyuk A.S., Tretyakov Yu.P. In: *Proceedings of the Second International Conference on Ion Sources*, SGAE, Vienna, 1972, p. 512.
Третьяков Ю.П., Пасюк А.С. В кн.: *Труды IV Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц*. "Наука", М., 1975, том 2, стр. 43.
2. Schulte H., Jacoby W., Wolf B.H. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, NS-23, 1976, p. 1042.

3. Gavin B. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, NS-23, 1976, p. 1008.
4. Keller R., Müller M. *Workshop on EBIS and Related Topics, Darmstadt, June 15-16, 1977, GSI - P - 3 - 77, p. 7.*
5. Третьяков Ю.П. и др. В кн.: *Труды II Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц*. "Наука", М., 1972, том 1, стр. 122.
6. Hudson E.D., Mallory M.L., Lorel R.S. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, NS-23, 1976, p. 1065.

Рукопись поступила в издательский отдел
20 января 1978 года.