

**ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА**

P7-84-578

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

**ИСТОЧНИК МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ  
ТВЕРДЫХ ВЕЩЕСТВ  
ДЛЯ УСКОРИТЕЛЕЙ**

Направлено на VIII межотраслевое совещание  
по обмену опытом эксплуатации  
и усовершенствования электростатических  
ускорителей /Харьков, 1984/

**1984**

Новые исследования в области ядерной и атомной физики и решение ряда прикладных задач, таких, как, например, производство полиядерных фильтров и исследования радиационной стойкости материалов <sup>1/</sup>, требуют применения пучков ускоренных многозарядных ионов /МЗИ/ элементов, имеющих в виде твердых материалов, в первую очередь металлов. В этой связи в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ на основе циклотронного источника МЗИ азота <sup>2/</sup> был разработан источник МЗИ с катодным распылением рабочего вещества <sup>3/</sup>. В дальнейшем он был усовершенствован <sup>4/</sup> и в настоящее время используется на циклотронах У-400 и У-300 ОИЯИ. В ходе испытаний различных конструкций источников на циклотронах и стенде были получены МЗИ более 30 металлов и неметаллов (В, С, Р, S, Se). На циклотронах ускорены ионы ряда разделенных изотопов металлов, в том числе такого дефицитного и дорогостоящего изотопа, как <sup>48</sup>Ca <sup>5/</sup>.

Ионные источники такого типа нашли применение в инжекторах линейных ускорителей в Дармштадте <sup>6/</sup> и Беркли <sup>7/</sup>, а также во внешнем инжекторе ускорителя ЭСУВИ в Харькове <sup>8/</sup>.

Устройство источника МЗИ с катодным распылением твердого рабочего вещества рассмотрим на примере конструкции источника, используемого в настоящее время на циклотроне У-400 /рис.1/. Он представляет собой источник PIG-типа с подогревным катодом, размещенный во внешнем магнитном поле, в данном случае в зазоре электромагнита.

Важной особенностью нового источника, позволяющей снизить расход газа, является герметизация разрядной камеры, торцы которой уплотнены с помощью кольцевых изоляторов <sup>3/</sup>. В случае герметизации вспомогательный газ, поступающий в разрядную камеру, имеет выход в объем ускорителя главным образом через эмиссионную щель. Это привело к уменьшению расхода газа /расход Хе снижен до 0,15 см<sup>3</sup>/мин по сравнению с 0,3 см<sup>3</sup>/мин без герметизации/, а следовательно, к улучшению вакуума в камере ускорителя, что весьма важно для снижения потерь при ускорении тяжелых МЗИ.

С целью увеличения выхода МЗИ из источника были проведены исследования различных катодных материалов: вольфрама, вольфрама с присадками алюминия, вольфрама с добавкой рения <sup>27%</sup>, молибдена, рения, тантала, которые показали, что применение катода из тантала приводит к увеличению выхода МЗИ и достижению более высокозарядных состояний <sup>9/</sup>. На источниках циклотронов сейчас преимущественно используются катоды и антикатоды из тантала, это дало увеличение интенсивности, например, пучков ионов <sup>9+</sup>Fe - в 10 раз.



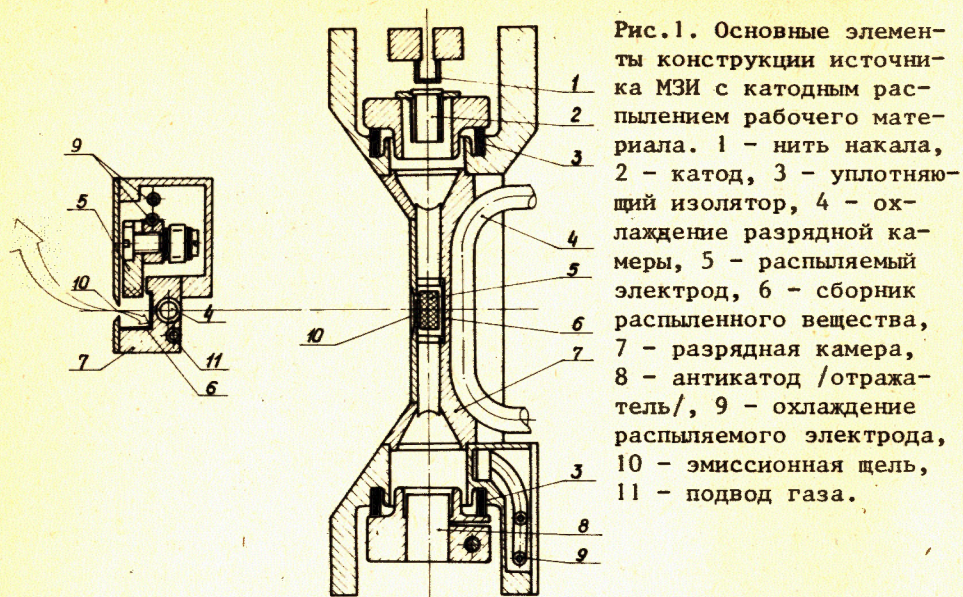


Рис.1. Основные элементы конструкции источника МЗИ с катодным распылением рабочего материала. 1 - нить накала, 2 - катод, 3 - уплотняющий изолятор, 4 - охлаждение разрядной камеры, 5 - распыляемый электрод, 6 - сборник распыленного вещества, 7 - разрядная камера, 8 - антикатод /отражатель/, 9 - охлаждение распыляемого электрода, 10 - эмиссионная щель, 11 - подвод газа.

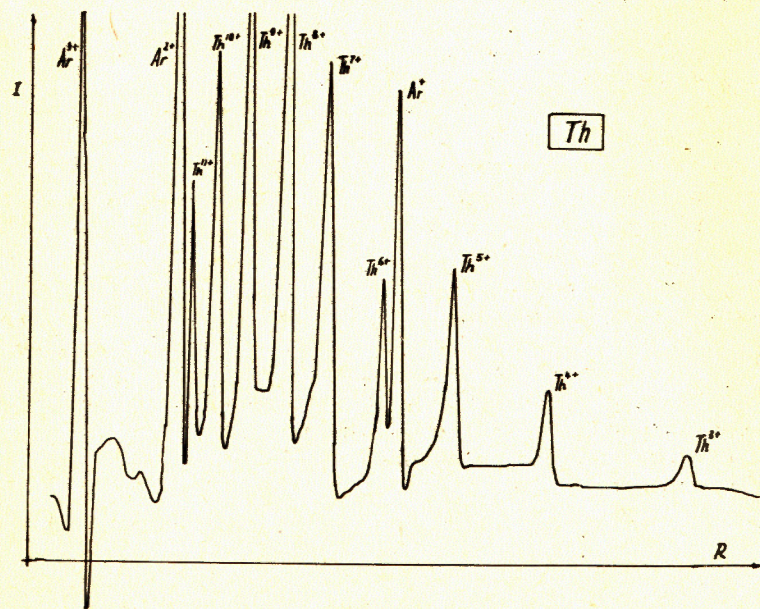


Рис.2. Зарядовое распределение ионов Th, полученное на модели ионного источника циклотрона У-400 на стенде. Интенсивности ионов Th по зарядностям составляют:  $3^+$  - 1,6 мА;  $4^+$  - 4,2 мА;  $5^+$  - 8,5 мА;  $6^+$  - 6,7 мА;  $7^+$  - 14,9 мА;  $8^+$  - 17,9 мА;  $9^+$  - 18,5 мА;  $10^+$  - 12,1 мА;  $11^+$  - 4,8 мА.

В ходе разработки и усовершенствования источников МЗИ с катодным распылением рабочего материала проводились испытания различных вариантов конструкции на стенде, который описан в /10/. В испытаниях источника проводилась ионизация ряда элементов вплоть до тория. Результаты испытаний, которые приведены в табл.1, показали, что из источника могут быть получены интенсивные пучки ионов тяжелых элементов с отношением  $A/z \sim 20$ . Например, импульсный ток ионов  $^{11+}Th$  составляет 4,8 мА/рис.2/. В табл.2 представлена часть элементов периодической системы Д.И.Менделеева, ионы которых были получены из источника с катодным распылением рабочего вещества на стенде и циклотронах. Переход от ионов одного элемента к ионам другого в данном источнике МЗИ связан лишь с установкой соответствующего распыляемого электрода. Вместе с тем, технология изготовления электродов для каждого элемента, а в случае использования разделенных изотопов - для каждого изотопа, является сугубо индивидуальной, а в отдельных случаях достаточно сложной /11/.

В качестве исходного вещества для получения ионов использовались неметаллы В, Se, графит и металлы Be, Mg, Al, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Zr, Nb, Mo, Cd, In, Sn, La, Hf, Ta, W, Re, Rb, Bi, Th; химические соединения LiF, MgO, CaF<sub>2</sub>, CaO, TiO<sub>2</sub>, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>S, PbSe, монокристаллы Si, Ge, сплавы и конструкционные материалы дюралюминий, фосфорная медь, титановый сплав OT-4 /11/, ферромарганец, нержавеющая сталь, нихром. Как правило, рабочее вещество помещалось только в рабочей части электрода, обращенной к плазме разряда и непосредственно подверженной катодному распылению. В этом случае соединение рабочей части электрода, имеющей толщину 1-6 мм, с основанием электрода, изготовленным из конструкционного материала /медь, нержавеющая сталь/, производится одним из известных способов: пайкой, склеиванием, диффузионной сваркой в вакууме или точечной электросваркой, прессованием под давлением. При этом должны быть обеспечены прочность и хорошая электропроводность распыляемой части электрода и отвод тепла от бомбардируемой ионами поверхности. В отдельных случаях электрод может быть полностью выполнен из рабочего материала. Используемые материалы и способ изготовления электродов для каждого элемента указаны в табл.2.

Изготовление электродов из металлоидов и непроводящих соединений производилось с помощью разработанной в ЛЯР специальной технологии - горячего динамического прессования электродов в вакууме /12/. Эта технология является основным способом изготовления электродов при использовании в качестве рабочего вещества разделенных изотопов, которые по технологии получения и регенерации, а также по условиям хранения имеются в виде окислов или солей металлов. Рабочая часть электрода, изготовленного методом горячего динамического прессования, представляет собой однородную твердую суспензию рабочего материала в пластичном металле

Таблица 1

Выход ионов металлов из источника на стендовых испытаниях

Ионы элемент Заряд Сп- аида вол	Режим АЧД		Результат		Ток ионов рабочего вещества в амперах, мк										Полный ток ионов рабочего вещества, мА		Удельный выход				
	123	123	И, мА	В, мА	1+	2+	3+	4+	5+	6+	7+	8+	9+	10+	11+	12+	мг	% от осн.	Мг/ч	Ц, еб	
12 Mg	660	7,5	520	2	Ar	18,4	84,9	31,8	3,0	0,4	0,06	0,005					140	77		3,6	15
13 Al	300	8,2	980	1,9	Kr	22	59,1	20	3,4	0,25	0,04						105	100		3,6	15
14 Si	620	11	1900	2,9	Kr	12,1	45,5	34,9	12,8	1,6	0,18	0,018					104	80		3,6	24
20 Ca	600	9,5	540	1,8	Kr	3,0	23	22	14	4,5	1,0	0,18	0,035				66	60		3,6	17
21 Sr	500	8	1700	0,64	Kr	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	Kr	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	Kr	6,3	19	12	14	6,4	1,1	0,15	0,029				59	74		4,4	21
24 Cr	1200	15	850	1,0	Kr	3,7	10,8	5,2	10,3	8,8	3,3	0,55	0,059	0,002			43	65		4,4	20
25 Mn	650	8,5	800	0,7	Kr	5	16	18	11,3	6,1	1,6	0,39	0,09	0,026	0,001		56	83		4,4	20
26 Fe	500	15	790	1,3	Kr	12,5	19	15	10	1,7	0,33	0,12	0,04	0,004			38	76		5,3	25
28 Ni	620	9,5	700	1,6	Kr	8,5	15,5	10,3	4,9	2,4	1,1	0,14	0,01				59	70		3,6	22
30 Zn	540	10,0	400	2,3	Ar	29,6	31,7	35,3	25	6,6	1,9						150	70		3,6	22
32 Pb	900	5,5	580	1,6	Kr	69,6	54,7	29,3	3,5	3,85	0,76	0,2	0,024				170	93		3,6	15
40 Ca	700	20	880	1,6	Kr	8,4	15,8	9,5	11,1	6,4	1,35	0,48	0,09				54	77		3,6	20
42 Mo	380	9,5	840	1,8	Kr	0,7	4,8	6,8	11	17,8	3,8	1,1	0,33	0,044	0,004		29	45		4,4	24
48 Cd	900	10	200	1,0	Ar	24,0	24,6	23,3	15,8	9,4	2,0	0,4					100	90		3,6	15
49 In	540	11,5	1250	0,65	Ar	1,7	3,3	6,4	7,4	4,4	3,2	1,2	0,33	0,011	0,025		146	90		4,4	20,5
50 Zn	840	14,5	550	0,75	Kr	1,6	2,6	3,3	2,9	3,0	3,7	1,3	0,13				29	65		5,3	25
57 La	470	9,8	970	1,5	Ar	1,6	8,5	7,7	7,9	5,5	5,0	3,3	2	0,9	0,042		170	40		4,4	20
74 W	360	9,0	980	1,4	Ar	20	17,1	13,1	6,8	3,3	0,7	0,12					57	57		3,6	15
75 Os	590	20	540	2,8	Ar	14,9	13,7	12,4	14,3	8,8	6	0,9	0,6				61	65		3,6	15
83 Br	630	8,5	480	0,5	Ar	2,4	2,8	5,6	6,3	4,2	2,8	1,2	0,31	0,22	0,03		86	66		5,7	18
83 Br	630	8,5	480	0,5	Ar	2,4	2,8	5,6	6,3	4,2	2,8	1,2	0,31	0,22	0,03		30	55		3,6	17

Примечание: 1/ Величины токов приближительны; точному определению мешают пики N<sup>+</sup> и Ar<sup>3+</sup>.

Таблица 2

Элементы, ионы которых получены из источника с катодным распылением рабочего вещества

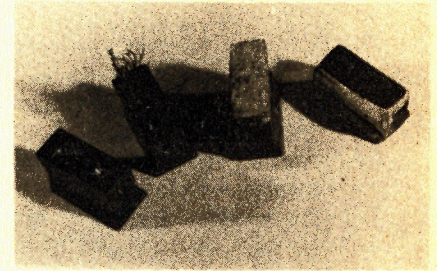
	I	II	III	IV	V	VI	VII
2	<sup>3</sup> Li <sub>оп</sub>	<sup>4</sup> Be <sub>ос</sub>	<sup>5</sup> B <sub>охп</sub>	<sup>6</sup> C <sub>гп</sub>			
3		<sup>12</sup> Mg <sub>оп</sub>	<sup>13</sup> Al <sub>оп</sub>	<sup>14</sup> Si <sub>оп</sub>	<sup>15</sup> P <sub>оп</sub>	<sup>16</sup> S <sub>ос</sub>	
4	<sup>20</sup> Cu <sub>оп</sub>	<sup>20</sup> Ca <sub>оп</sub>	<sup>21</sup> Sc <sub>оп</sub>	<sup>22</sup> Ti <sub>оп</sub>	<sup>23</sup> V <sub>оп</sub>	<sup>24</sup> Cr <sub>оп</sub>	<sup>25</sup> Mn <sub>ос</sub>
		<sup>30</sup> Zn <sub>оп</sub>		<sup>32</sup> Ge <sub>оп</sub>		<sup>34</sup> Se <sub>оп</sub>	<sup>26</sup> Fe <sub>ос</sub>
				<sup>40</sup> Zr <sub>ос</sub>	<sup>41</sup> Nb <sub>оп</sub>	<sup>42</sup> Mo <sub>оп</sub>	<sup>27</sup> Co <sub>ос</sub>
5		<sup>48</sup> Cd <sub>оп</sub>	<sup>49</sup> In <sub>оп</sub>	<sup>50</sup> Sn <sub>оп</sub>			<sup>28</sup> Ni <sub>ос</sub>
6			<sup>57</sup> La <sub>ос</sub>	<sup>72</sup> Hf <sub>ос</sub>	<sup>73</sup> Ta <sub>ос</sub>	<sup>74</sup> W <sub>ос</sub>	<sup>75</sup> Re <sub>ос</sub>
				<sup>82</sup> Pb <sub>оп</sub>	<sup>83</sup> Bi <sub>оп</sub>		
7	<sup>90</sup> Th <sub>оп</sub>						

В рамках - элементы, ионы которых усорены на циклотронах  
 \* - использованы разделенные изотопы

Исходный материал:  
 о - чистый элемент  
 \* - химическое соединение  
 □ - сплав  
 Δ - интерметаллид

Способ изготовления электрода:  
 р - резание  
 с - сварка (диффузионная, точ.)  
 л - пайка, склеивание  
 в - впавление в основание  
 гп - горячее прессование в вакууме  
 хп - холодное прессование

Рис.3. Распыляемые электроды для ионного источника циклотрона У-300, изготовленные методом горячего динамического прессования.



(например, медь, серебро, золото), армированную проволокой, закрепленной в проводящем /медном/ основании. Этапы изготовления распыляемого электрода и вид электрода до и после работы показаны на рис.3 /на примере электрода из окиси кальция-48 для ионного источника циклотрона У-300/.

Многолетний опыт эксплуатации источника МЗИ с катодным распылением рабочего вещества показал, что он является надежным и удобным в эксплуатации, позволяющим получать на ускорителях интенсивные пучки многозарядных ионов практически всех элементов периодической системы Д.И.Менделеева. В ОИЯИ предполагается дальнейшее использование и усовершенствование источников ионов твердых веществ такого типа.

Авторы признательны академику Г.Н.Флерову и профессору Ю.Ц.Оганяну за постоянный интерес и стимулирование работ с источниками многозарядных ионов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Флеров Г.Н. Вестник АН СССР, 1984, вып.4, с.35-48.
2. Морозов Л.И., Маков Б.Н., Иоффе М.С. АЭ, 1957, т.2, вып.53, с.272-275.
3. Третьяков Ю.П. и др. ОИЯИ, Р7-4477, Дубна, 1969; АЭ, 1970, т.28, вып.5, с.423.
4. Третьяков Ю.П. и др. В сб.: Труды VII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. ОИЯИ, Дубна, 1981, т.1, с.81-84; Третьяков Ю.П., Соловьева Г.М. Циклотронный источник многозарядных ионов. Авт.свид.СССР, №502422. Бюл.ОИПОТЗ, 1976, №5, с.172; Третьяков Ю.П., Соловьева Г.М. Циклотронный источник многозарядных ионов. Авт.свид.СССР №637894. Бюл.ОИПОТЗ, 1978, №46, с.167.
5. Флеров Г.Н. и др. ОИЯИ, Д7-9555, Дубна, 1976.
6. Schulte H., Jacoby W., Wolf B. IEEE Trans. on Nucl.Sci., 1976, NS-23, p.1042-1048.
7. Gavin B. et al. IEEE Trans.on Nucl.Sci., 1981, NS-28, No.4, p.2684-2686.
8. Бредихин М.Ю. и др. Вопросы атомной науки и техники /сер. Общая и ядерная физика/, 1980, вып.2/12/, с.65-68.
9. Пасюк А.С., Кутнер В.Б., Третьяков Ю.П. ПТЭ, 1980, №1, с.41-44.
10. Пасюк А.С., Го Ци-цзянь, Третьяков Ю.П. ОИЯИ, 1523, Дубна, 1963; Пасюк А.С., Третьяков Ю.П., Горбачев С.А. АЭ, 1968, т.24, с.21-25.
11. Богомолов С.Л. и др. В сб.: Труды VIII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. ОИЯИ, Дубна, 1983, т.1, с.112-115.
12. Третьяков Ю.П., Плотко В.М. Распыляемый электрод для ионного источника. Авт.свид.СССР №679083. Бюл.ОИПОТЗ, 1981, №22, с.308.

Рукопись поступила в издательский отдел  
14 августа 1984 года.

## НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги, если они не были заказаны ранее.

	Труды VI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1978 /2 тома/	7 р. 40 к.
	Труды VII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1980 /2 тома/	8 р. 00 к.
	Труды УШ Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Протвино, 1982 /2 тома/	11 р. 40 к.
D11-80-13	Труды рабочего совещания по системам и методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применению в теоретической физике, Дубна, 1979	3 р. 50 к.
D2-81-543	Труды VI Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1981	2 р. 50 к.
D10,11-81-622	Труды Международного совещания по проблемам математического моделирования в ядерно-физических исследованиях. Дубна, 1980	2 р. 50 к.
D17-81-758	Труды II Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1981.	5 р. 40 к.
P18-82-117	Труды IV совещания по использованию новых ядерно-физических методов для решения научно-технических и народнохозяйственных задач. Дубна, 1981.	3 р. 80 к.
D2-82-568	Труды совещания по исследованиям в области релятивистской ядерной физики. Дубна, 1982.	1 р. 75 к.
D9-82-664	Труды совещания по коллективным методам ускорения. Дубна, 1982.	3 р. 30 к.
D3,4-82-704	Труды IV Международной школы по нейтронной физике. Дубна, 1982.	5 р. 00 к.
D11-83-511	Труды совещания по системам и методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применению в теоретической физике. Дубна, 1982.	2 р. 50 к.
D7-83-644	Труды Международной школы-семинара по физике тяжелых ионов. Алушта, 1983.	6 р. 55 к.
D2,13-83-689	Труды рабочего совещания по проблемам излучения и детектирования гравитационных волн. Дубна, 1983.	2 р. 00 к.
D13-84-63	Труды XI Международного симпозиума по ядерной электронике. Братислава, Чехословакия, 1983.	4 р. 50 к.
D2-84-366	Труды 7 Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1984.	4 р. 30 к.

Заказы на упомянутые книги могут быть направлены по адресу:  
101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79  
Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований

**ТЕМАТИЧЕСКИЕ КАТЕГОРИИ ПУБЛИКАЦИЙ  
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ**

Индекс	Тематика
1.	Экспериментальная физика высоких энергий
2.	Теоретическая физика высоких энергий
3.	Экспериментальная нейтронная физика
4.	Теоретическая физика низких энергий
5.	Математика
6.	Ядерная спектроскопия и радиохимия
7.	Физика тяжелых ионов
8.	Криогеника
9.	Ускорители
10.	Автоматизация обработки экспериментальных данных
11.	Вычислительная математика и техника
12.	Химия
13.	Техника физического эксперимента
14.	Исследования твердых тел и жидкостей ядерными методами
15.	Экспериментальная физика ядерных реакций при низких энергиях
16.	Дозиметрия и физика защиты
17.	Теория конденсированного состояния
18.	Использование результатов и методов фундаментальных физических исследований в смежных областях науки и техники
19.	Биофизика

Третьяков Ю.П., Кутнер В.Б., Пасюк А.И. P7-84-578  
**Источник многозарядных ионов твердых веществ для ускорителей**  
 Описан эффективный источник многозарядных ионов с катодным распылением рабочего вещества, выполненный на основе циклотронного источника с подогревным катодом и осциллирующей электронов. Из источника получены многозарядные ионы более чем 30 элементов: ионы высоких зарядностей металлов от Li до Th, полупроводников и ряда металлоидов / В, С, Р, S, Se /. Интенсивность пучков многозарядных ионов составляет от десятков мкА до нескольких десятков мА. Ионный источник в течение многих лет используется на циклотронах тяжелых ионов Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ и положен в основу разработок ионных источников ряда других установок. Описаны методы изготовления распыляемых электродов из различных материалов.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1984

Перевод М.И.Потапова

Tretyakov Yu.P., Kutner V.B., Pasyuk A.S. P7-84-578  
**Multicharged Ion Source from Solids for Accelerators**  
 An effective multicharged ion source with the cathode sputtering of working substance based on the cyclotron ion source with the indirectly heated cathode and electron oscillation is described. Multiply charged ions of more than 30 elements are received from this source: high-charged ions of metals from Li to Th, of semiconductors and of some metalloids ( В, С, Р, S, Se ). Intensity of the multicharged ion beams lies in the range from tens of  $\mu\text{A}$  to several tens of mA. The ion source have been used for heavy ion cyclotrons of the Laboratory of Nuclear Reactions of JINR for many years. Ion sources in other different equipment are based on this ion source.  
 The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Reactions, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1984