

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

P7-85-362

В.Б.Кутнер, Ю.Ц.Оганесян, А.С.Пасюк,
Ю.П.Третьяков, Г.Н.Флеров

ЦИКЛОТРОННЫЕ ИСТОЧНИКИ
ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ ЛЯР ОИЯИ
(Современное состояние и перспективы развития)

Направлено на Международное совещание
по циклотронам /ЧССР, 1985/

1985

Циклотронные источники тяжелых ионов ЛЯР ОИЯИ
/Современное состояние и перспективы развития/

Описаны циклотронные источники для получения пучков ионов стабильных, радиоактивных и токсичных изотопов. Представлены данные по выходу пучков тяжелых ионов из источников дугового типа с косвенным подогревом катода и осцилляцией электронов в магнитном поле. Обсуждаются проблемы получения и ускорения интенсивных и высокозарядных пучков тяжелых ионов. Приводятся результаты исследований источников ионов новых типов: лазерного и с электронно-циклотронным резонансом и рассматриваются перспективы их применения на циклотронах.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1985

Перевод О.С.Виноградовой

Heavy Ion Sources for the LNR JINR Cyclotrons

The cyclotron ion sources designed for production of the beams of ions of stable, radioactive and toxic isotopes are described. Data on the yields of heavy ions from the arc source with an indirectly heated cathode and electron oscillation in the magnetic field are presented. The problems of obtaining and accelerating intense highly-charged heavy ion beams are described. The results of investigation of the new types of ion sources, namely, laser and electron resonance sources are presented, and their future application on the cyclotrons are reviewed.

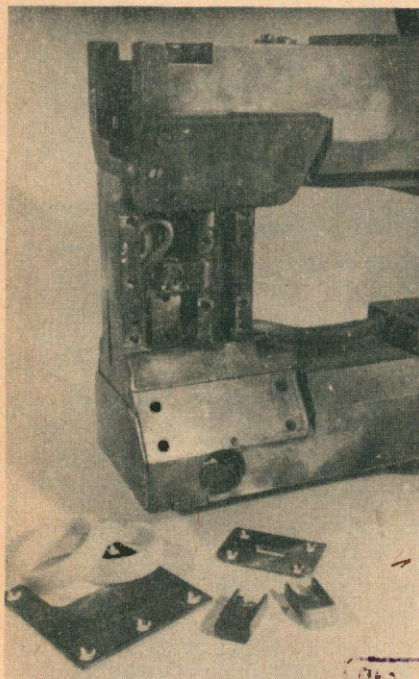
The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Reactions, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1985

Последние годы были отмечены новыми успехами в развитии циклотронной техники ^{/1,2/} и, в частности, источников многозарядных ионов ^{/3,4/}. Известно, что на ряде циклотронов /Лувен-ля-нев (Бельгия), Карлсруэ (ФРГ), Беркли (США) и других ^{/5/} начали успешно применяться источники нового типа, в которых используется явление электронно-циклотронного резонанса. Дальнейший прогресс традиционного для циклотронов дугового источника многозарядных ионов способствовал получению ускоренных пучков большой интенсивности радиоактивного изотопа ^{14}C ^{/6/}.

Успешное и быстрое развитие источников многозарядных ионов определяется новыми задачами физики тяжелых ионов. Эти задачи требуют не только повышения энергии /до 100 МэВ/нуклон и выше/ уже полученных пучков, но и повышения интенсивности ионов $> 10^{12}\text{c}^{-1}$ / во всем ускоряемом диапазоне, а также получения так называемых "экзотических" пучков радиоактивных и токсичных изотопов.

Ниже рассматривается современное состояние источников многозарядных ионов с этих трех точек зрения, а именно диапазона, интенсивности и заряда ускоряемых тяжелых ионов, а также обсуждаются тенденции дальнейшего развития источников ионов на циклотронах.



ДУГОВОЙ ИСТОЧНИК ИОНОВ

В ЛЯР ОИЯИ в настоящее время на циклотронах используется дуговой источник многозарядных ионов, в результате успешного развития которого ^{/7,8/} /рис.1/ на циклотроне У-400 получены интенсивные пучки $/10^{12} \div 10^{14}\text{c}^{-1}$ / ионов в диапазоне масс $\text{N}^{2+} \div \text{Kr}^{9+}$. Из этого источника получены пучки высокозарядных ионов газов, например,

Рис.1. Головка ионного источника с катодным распылением рабочего вещества циклотрона У-400.

ОТДЕЛ РАДИОФИЗИКИ
 ИОННОЙ ФИЗИКИ
 БЕРКЛИ

Таблица 1

Выход ионов твердых веществ из источника в исследованиях на стенде

Иониз. элем.	Режим разряда	Режим растопки	Вспомог. газ	Ток ионов кондензуемого элемента в импульсе, мА										Полный ток ионов азота	Условия				
				I+	2+	3+	4+	5+	6+	7+	8+	9+	10+			11+	12+	ма	ε
12 Mg	660 7,5	520 2,9	Ar	18	85	32	3,0	0,4	0,06	0,005						140	77	3,6	15
13 Al	300 8,2	980 1,9	Xe	22	59	20	3,4	0,25	0,04							105	95	3,6	15
14 Si	620 II	1900 2,5	Xe	12	46	35	13	1,6	0,18	0,018						104	60	3,6	24
15 P	1000 5,3	1000 1,0	Ar	3	6,3	5,5	1,2	0,26	0,03							16	18	3,6	17
20 Ca	600 9,5	540 1,8	Xe	3	23	22	14	4,5	1,0	0,18	0,035					66	60	3,6	17
21 Sc	500 8	1700 0,64	Xe	1,3	18	19	4,9	0,8	0,05	0,01						45	74	3,6	17
22 Ti	750 16	1250 2,4	Xe	2,1	8,5	14	14	8,8	1,1	0,33	0,035					43	43	4,4	22
23 V	900 15	1400 1,6	Xe	6,3	19	12	14	6,4	1,1	0,15	0,03					59	74	4,4	21
24 Cr	1200 15	850 1,0	Xe	3,7	11	5,2	10	8,8	3,3	0,55	0,06	0,002				48	63	4,4	21
25 Mn	630 8,5	800 0,7	Xe	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	Xe	3	13	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	Xe	13	19	15	10	2,5	0,53	0,06	0,01	0,002				59	70	3,6	17
28 Ni	800 6	1000 1,0	Xe	-	23	24	16	6,7	1,5	0,44	0,08	0,03				73	60	3,6	17
29 Cu	540 10	400 2,3	Ar	-	30	32	35	26	5,6	1,9						150	70	3,6	17
30 Zn	400 7,5	560 1,6	Xe	-	70	55	29	9,5	3,95	0,76	0,2	0,024				170	93	3,6	15
32 Ge	900 5,5	2000 0,5	Ar	8,4	17	9,5	11	6,4	1,35	0,48	0,09					54	77	3,6	20
34 Se	950 10	500 0,65	Xe	-	3,9	9,5	7,6	5,8	1,35	0,56	0,18	0,01				29	32	5,3	22
40 Zr	1100 5	1100 0,8	Ar	-	6,9	4,1	5,9	3,72	1,41	1,0	0,47	0,15	0,04			24	34	3,6	16
41 Nb	700 20	880 1,6	Xe	0,7	4,8	6,8	11	17,3	3,8	1,1	0,33	0,044	0,004			29	45	4,4	24
42 Mo	380 9,5	940 1,8	Xe	-	24	25	23	16,8	9,4	2,0	0,4					100	90	3,6	15
48 Cd	900 10	200 1,0	Ar	-	14	18	28	37	22	11,3	3	0,74	0,11	0,025		146	90	4,4	20,5
49 In	540 11	1250 0,65	Ar	-	1,7	3,3	6,4	7,4	4,4	3,2	1,2	0,33	0,018			29	65	5,3	26
50 Sn	840 11	550 0,75	Xe	-	1,6	2,6	3,3	2,9	3,0	3,7	1,3	0,13				18	40	4,5	22
57 La	760 11	850 1,1	Xe	-	-	8,5	7,7	7,9	5,5	5,0	3,3	2,0	0,9	0,042		57	57	4,4	20
72 Hf	650 7	750 1,0	Ar	3,9	4,1	3,6	4,5	4,71	2,33	0,6	0,21	0,05	0,01			24	72	5,3	18
73 Ta	470 9,8	970 1,5	Ar	-	-	-	11,4	18,9	12,5	8,4	3,0					54	65	3,6	15
74 W	360 9	980 1,4	Xe	-	-	20	17,1	13,1	6,8	3,3	0,7	0,12				61	65	3,6	15
75 Re	580 20	540 2,8	Ar	-	15	14	12,4	14,3	8,6	6	0,9	0,6				86	68	5,7	18
82 Pb	950 10	500 0,65	Xe	-	-	1,3	4,9	5,5	8,95	8,8	7	3,9	2,1			42	46	5,3	22
83 Bi	860 8,5	480 0,5	Ar	-	-	2,4	2,8	5,6	6,3	4,2	2,0	1,2	0,91	0,22	0,03	30	55	3,6	17
90 Th	1200 10	750 0,9	Ar	-	-	1,6	4,3	8,6	6,8	15	18	12	4,8			89	53	5,3	17

Таблица 2

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

I	II	III	IV	V	VI	VII
³ Li _{оп} *	⁴ Be _{ос}	⁵ B _{охп}	⁶ C _{оп}			
	¹² Mg _{оп} *	¹³ Al _{оп}	¹⁴ Si _{оп}	¹⁵ P _{оп}	¹⁶ S _{ос}	
	²⁰ Ca _{оп} *	²¹ Sc _{оп}	²² Ti _{оп} *	²³ V _{оп}	²⁴ Cr _{оп} *	²⁵ Mn _{ос}
	²⁹ Cu _{оп} *	³⁰ Zn _{оп} *	³² Ge _{оп}		³⁴ Se _{охп}	
			⁴⁰ Zr _{ос}	⁴¹ Nb _{оп}	⁴² Mo _{оп}	
	⁴⁸ Cd _{оп}	⁴⁹ In _{оп}	⁵⁰ Sn _{оп}			
		⁵⁷ La _{ос}	⁷² Hf _{ос}	⁷³ Ta _{ос}	⁷⁴ W _{ос}	⁷⁵ Re _{ос}
			⁸² Pb _{оп}	⁸³ Bi _{оп}		

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

Способ изготовления электрода
 р - резание
 с - сварка (диффузионная, точ)
 п - пайка, склеивание
 в - впаивание в основание
 гп - горячее прессование в вакууме
 хп - холодное прессование

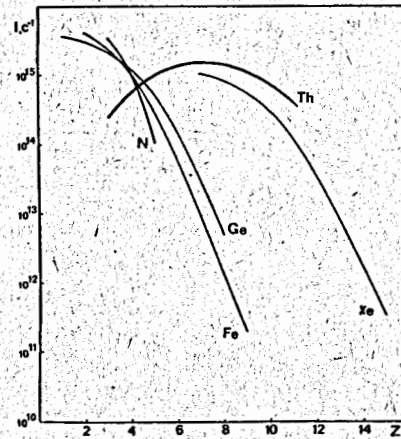


Рис.2. Относительный выход ионов N, Fe, Ge, Xe и Th из дугового циклотронного источника в режиме оптимизации на максимальную зарядность.

Ar⁸⁺, Kr¹¹⁺ и Xe¹⁵⁺, с интенсивностью соответственно 1,5 · 10¹³, 8 · 10¹¹ и 4 · 10¹¹ с⁻¹. Элементы, ионы которых получены из источника с катодным распылением рабочего вещества, и сравнительный выход некоторых ионов из источника представлены в табл.1 и на рис.2.

На циклотронах ЛЯР ускорена значительная часть ионов элементов периодической системы Д.И.Менделеева /табл.2/.

Основные работы с ионными источниками на циклотроне У-400 связаны с получением и ускорением до энергий, больших 6 МэВ/нуклон, пучков ионов разделенных изотопов^{9/} от Mg до Ge /табл.3/. Это связано с эффективностью синтеза тяжелых элементов в реакциях полного слияния тяжелого ядра мишени с ускоренными ионами нейтронно-обогащенных изотопов. При облучении мишени ионами ⁴⁸Ca, ⁵⁴Cr, ⁵⁸Fe, ⁶⁴Ni, ⁷⁸Ge и др.^{10/} удается уменьшить нейтронный дефицит синтезируемых ядер по сравнению с реакциями полного слияния на других ионах. Однако содержание редких изотопов в естественной смеси составляет от нескольких процентов до долей процента, например, для ⁴⁸Ca - 0,187%. Поэтому задача получения интенсивных пучков ионов обогащенных изотопов была решена путем создания специальных конструкций ионных источников.

Последние результаты работ с ионными источниками на циклотроне У-300 связаны с получением и ускорением пучков ионов радиоактивного изотопа ¹⁴C, а также Be и Li.

В проблеме ускорения многозарядных ионов на циклотронах наиболее трудной методической задачей является получение пучков ионов радиоактивных изотопов, в частности, углерода-14.

Вместе с тем реакции перезарядки с ускоренными ионами ¹⁴C являются весьма перспективными, так как могут приводить к образованию ⁶H, ⁷H, ⁹He, ¹⁰He и других нуклидов, расположенных на границе ядерной стабильности^{11/}.

Кроме того, пучки ускоренных ионов ¹⁴C являются уникальным инструментом, позволяющим синтезировать и исследовать свойства изотопов трансформированных элементов. Например, реакция ²⁴⁹Cf(¹⁴C, 3n)²⁶⁰Ku с большим сечением и низким фоном приводит к образованию ядер 104-го элемента.

Таблица 3

Разделенные изотопы металлов, ускоренные на циклотроне У-400

Ускоряемый ион	Исходное вещество	Содержание изотопа в электроде, ат, %	Вещество после регенерации	Интенсивность внутреннего пучка, част/с
$^{26}\text{Mg}^{3+}$	MgO	37	MgO	$1,2 \cdot 10^{13}$
$^{48}\text{Ca}^{5+}$	CaO	20	CaO	$2,4 \cdot 10^{12}$
$^{49}\text{Tl}^{5+}$	TlO ₂	11	TlO ₂	$1,0 \cdot 10^{13}$
$^{50}\text{Tl}^{5+}$	TlO ₂	10	TlO ₂	$9,6 \cdot 10^{12}$
$^{53}\text{Cr}^{5+}$	Cr ₂ O ₃	17	-	$6,0 \cdot 10^{12}$
$^{54}\text{Cr}^{6+}$	Cr	36	Cr	$6,3 \cdot 10^{12}$
$^{58}\text{Fe}^{6+}$	Fe	91	Fe	$1,0 \cdot 10^{13}$
$^{64}\text{Ni}^{6+}$	Ni	78	-	$3,5 \cdot 10^{12}$
$^{70}\text{Zn}^{8+}$	Zn	45	-	$4,0 \cdot 10^{11}$
$^{76}\text{Ge}^{8+}$	Ge	74	-	$1,0 \cdot 10^{12}$

Для этих и других задач физики тяжелых ионов были ускорены пучки ионов $^{14}\text{C}^{2+}$ и $^{14}\text{C}^{3+}$ из газоразрядного дугового источника ионов, в который в качестве рабочего газа подавалась двуокись углерода $^{14}\text{CO}_2$.

Так как $^{14}\text{CO}_2$ является радиоактивным газом и попадание его в атмосферу недопустимо, была разработана замкнутая система подачи, улавливания и регенерации рабочего газа /рис.3/ и проведены исследования с целью определения оптимального расхода радиоактивного изотопа.

В результате решения всего комплекса проблем были ускорены ионы $^{14}\text{C}^{2+}$ и $^{14}\text{C}^{3+}$ с энергиями 5,1, и 11,5 МэВ/нуклон соответственно.

При предельно низком расходе рабочего газа $^{14}\text{CO}_2$, который составил $0,03 \text{ см}^3/\text{мин}$, получены выведенные пучки ионов $^{14}\text{C}^{2+}$ с интенсивностью $9 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}$ и $^{14}\text{C}^{3+}$ с интенсивностью $2 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}$ при энергетическом разрешении 0,8%. В результате специальных

мер и ступенчатой очистки на перезарядных фольгах количество ионов ^{14}N составило всего лишь $10^{-1}\%$.

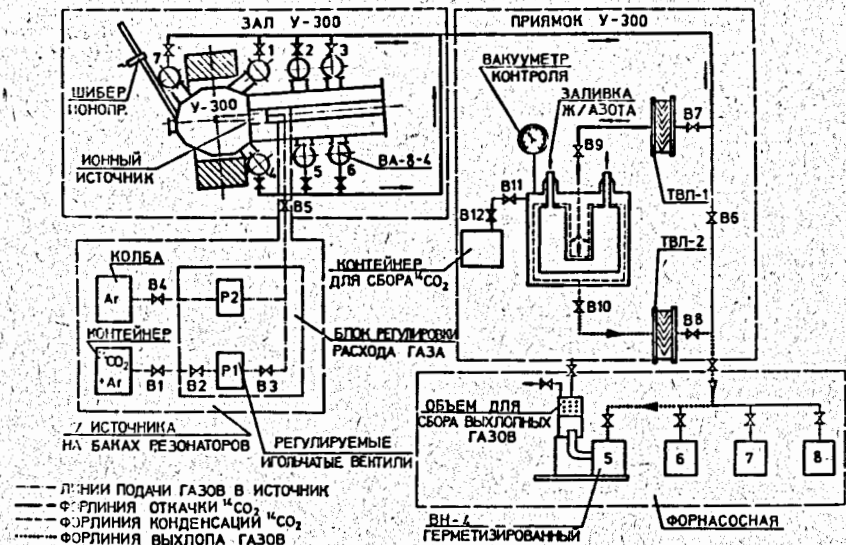


Рис.3. Система напуска рабочего газа в ионный источник и улавливания $^{14}\text{CO}_2$ на циклотроне У-300.

ЛАЗЕРНЫЙ ИСТОЧНИК

Наряду с развитием дугового источника многозарядных ионов в ЛЯР ОИЯИ проводятся исследования характеристик лазерной плазмы с целью создания на основе лазера циклотронного источника ионов ^{12}C . Схема такого источника показана на рис.4. Конструктивной особенностью лазерного источника ионов для циклотрона является расположение мишенного узла с рабочим веществом по отношению к эмиссионной щели источника. В зависимости от этого плазменный факел может быть направлен под углом к магнитному полю циклотрона либо вдоль силовых линий магнитного поля. От выбора направления распространения плазменного факела зависит эффективность извлечения ионов и захват их в процесс ускорения. Результаты работ по получению и ускорению ионных пучков из лазерных источников представлены в табл.4 и на рис.5.

Таблица 4

Параметры пучков ионов, ускоренных на циклотроне У-200 из лазерной плазмы

Характеристики лазера	Направление плазменного факела к магнитному полю				Параметры пучков, ускоренных на циклотроне		
					A, z	I, с ⁻¹	τ, мкс
Тип λ, мкм	Φ, Вт/см ²	W, Дж	f, Гц	под углом	C ³⁺ -Cr ¹³⁺	10 ¹⁰ -10 ⁷	10÷1
Co ₂	10,6 · 10 ⁹	0,4	1	вдоль	Li ³⁺ -Ta ⁴⁺	8 · 10 ¹⁰	2

Таблица 5

Оценки выхода многозарядных ионов из ECR-H источника

Газ	Интенсивность, с ⁻¹				
	Z _i	6 ⁺	8 ⁺	10 ⁺	11 ⁺
Ne		4 · 10 ¹¹	6 · 10 ¹⁰	5 · 10 ⁹	-
Ar		-	10 ¹²	-	8 · 10 ¹¹

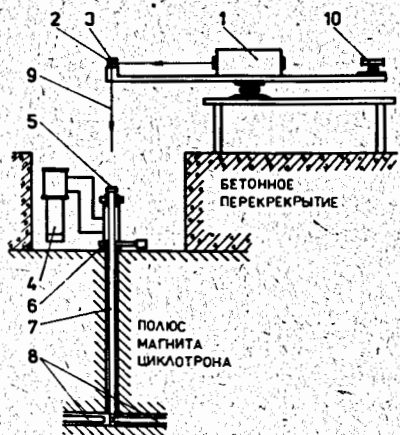


Рис.4. Схема циклотронного лазерного источника ионов.

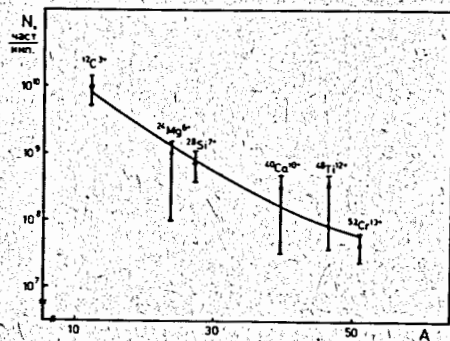


Рис.5. Интенсивность пучков ионов элементов от С до Сг, ускоренных на циклотроне У-200.

ECR - ИСТОЧНИК

Другим типом ионных источников, представляющих интерес для циклотронов ЛЯР, является источник многозарядных ионов с электронно-циклотронным резонансом (ECR). В настоящее время совместно с группой Университета дружбы народов им.П.Лумумбы проводятся исследования возможности использования варианта такого источника со слоем горячих электронов (ECR - H)⁴. На рис.6 представлена схема такого источника. Цилиндрический одномодовый резонатор, помещенный между полюсами постоянного магнита /силовые линии перпендикулярны плоскости рисунка/, возбуждается на моде TE₁₁₁ от магнетронного генератора ($\omega/2\pi = 2375$ МГц, P = 150 Вт) с помощью двух разнесенных по азимуту на 90° коаксиальных фидеров, фазы колебаний в которых также сдвинуты на 90°. Внутри резонатора помещена пирексовая вакуумная камера, в которую подается рабочий газ. В камере при давлении газа 5 · 10⁻⁵ мм рт.ст. возбуждается разряд в магнитном поле зеркальной конфигурации, создаваемом полюсами постоянного магнита. При соответствующем условию электронного циклотронного резонанса выборе конфигурации и величины магнитного поля в разряде образуется кольцевой слой горячих электронов /T_e = 4 кэВ/. С целью извлечения ионов из такого ECR-источника на плазму разряда подается положительный потенциал 10 кВ с помощью введенного в нее электрода. Данные о выходе многозарядных ионов из такого ECR-источника, полученные в первых экспериментах, представлены в табл.5.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Дуговые источники многозарядных ионов в настоящее время позволяют в значительной мере реализовать преимущества циклотронного метода для ускорения интенсивных пучков тяжелых ионов. Однако с созданием крупных изохронных циклотронов увеличивается /до нескольких километров/ длина пути частиц при ускорении до конечной энергии. Поэтому чтобы снизить потери интенсивности ионного пучка, требуется повысить вакуум в зоне ускорения. В этой связи перспективы увеличения интенсивности пучка ионов на циклотроне У-400 могут быть связаны, например, с исследованиями и разработками источников ионов с малым расходом газа.

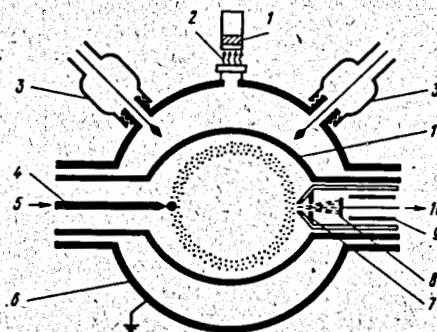


Рис.6. Схема ECR-источника со слоем горячих электронов.

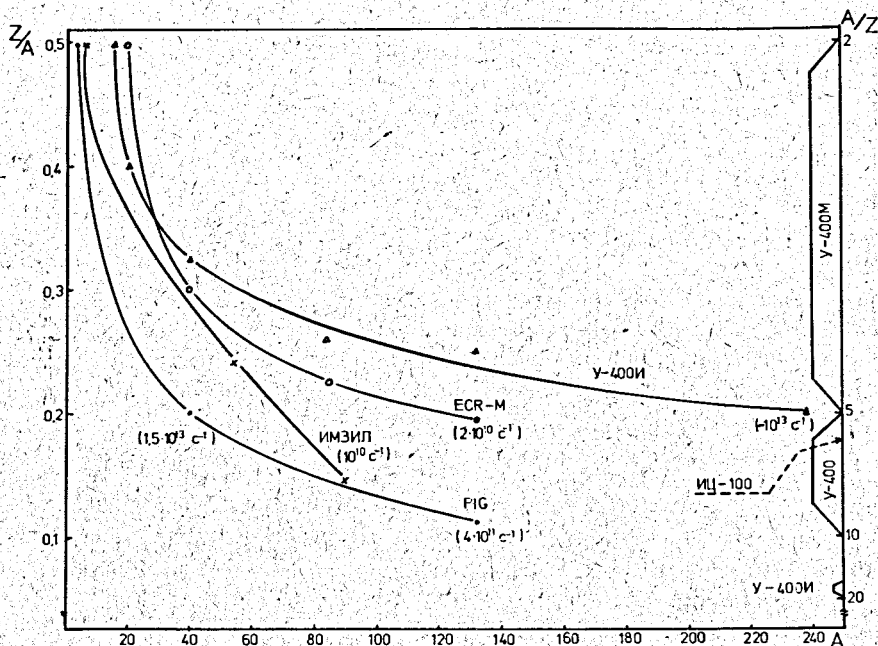


Рис.7. Характеристики пучков, полученных из дугового, лазерного, ECR источников ионов, и степень ионизации после обдирки на фольге пучка ионов из циклотрона-инжектора У-400 /У-400И/.

Обсуждая направления развития источников ионов для циклотронов, следует исходить из конкретных задач получения ускоренных пучков ионов. С этой целью на рис.7 представлены характеристики пучков ионов /отношение заряда к массе, интенсивность/ различных элементов из дугового, лазерного, ECR-источника и циклотрона-инжектора /У-400И/, а также диапазоны ускоряемых частиц для циклотронов У-400, У-400М и ИЦ-100 /18/.

Видно, что для получения интенсивных пучков ионов во всем диапазоне масс от ^{16}O до ^{238}U на циклотроне У-400М в настоящее время источником ионов может являться только циклотрон-инжектор У-400. При этом наиболее эффективным источником ионов для У-400И /У-400 в режиме инжектора/ является дуговой источник, из которого в диапазоне $A/Z = 16 \div 20$ могут быть получены интенсивные пучки /рис.8/. Однако в случае использования дугового источника предельной частицей, ускоряемой до энергии, большей 6 МэВ на нуклон, на У-400 является Хе. Для расширения диапазона ускоряемых на циклотроне У-400 частиц необходим источник ионов с большей, чем у дугового, кратностью ионизации. Поэтому дальнейшее развитие У-400 как самостоятельного циклотрона может быть связано, например, с перспективами ECR-источника. Следует также отметить, что источник с ECR-нагревом электронов может

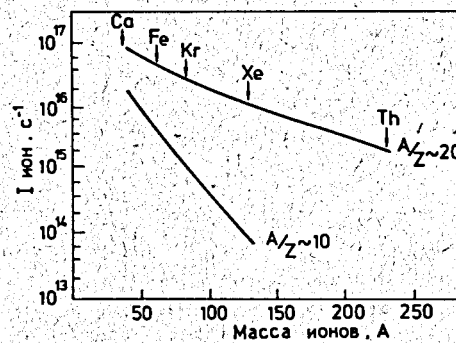


Рис.8. Возможности дугового источника ионов для циклотрона-инжектора У-400.

заменить циклотрон-инжектор /У-400И/ в тех случаях, когда эксперименты на У-400М не требуют высоких интенсивностей пучков. Понятно, что реализация ECR-источника требует создания системы аксиальной инжекции ионных пучков как для У-400М, так и для У-400. Оценки показывают, что создание такой системы на циклотроне У-400 позволит в несколько раз увеличить интенсивность пучков, ускоряемых из дугового источника ионов.

Результаты работ по ускорению на У-200 пучков ионов из лазерной плазмы показали принципиальную возможность реализации лазерного источника ионов на циклотроне. Достигнутая в настоящее время интенсивность пучков ионов составляет 10^{10} c^{-1} при частоте работы лазера 1 Гц и длительности импульса ионного пучка до 10 мкс. Поэтому перспективными представляются дальнейшие эксперименты с лазерным источником легких и средних элементов с целью увеличения длительности импульсов пучков и повышения эффективности отбора ионов в пучок из плазменного факела.

Таким образом, видно, что дуговые источники многозарядных ионов являются основой для создания циклотронного комплекса ЛЯР ОИЯИ и обеспечивают весь диапазон ускоряемых частиц. Успешное развитие новых ионных источников, а также создание эффективной системы внешней инжекции в циклотроны обеспечат дальнейший прогресс работ по ускорению тяжелых ионов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Флеров Г.Н. и др. ОИЯИ, 9-84-555, Дубна, 1984.
2. Oganessian Yu.Ts. et al. Proc. of IX Intern. Conf. on Cycl. and their Applications, Michigan, 1984, p.317.
3. Кутнер В.Б. ОИЯИ, P9-81-139, Дубна, 1981.
4. Головановский К.С. Атомная энергия, 1984, т.54, в.5, с.303.
5. Jongen Y. Proc. of IX Intern. Conf. on Cycl. and their Application, Michigan, 1984, p.322.
6. Ефремов А.А. и др. Девятое Всесоюзное совещание по ускорителям заряженных частиц. Аннотации докладов. ОИЯИ, P9-84-641, Дубна, 1984, с.9.
7. Третьяков Ю.П. и др. Труды VII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. ОИЯИ, Дубна, 1981, т.1, с.81.
8. Пасюк А.С. и др. ПТЭ, 1980, № 1, с.41.

9. Богомолов С.Л. и др. Труды УШ Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. ОИЯИ, Дубна, 1983, т.1, с.112.
10. Флеров Г.Н. Труды Международной школы-семинара по физике тяжелых ионов. ОИЯИ, Д7-83-644, Дубна, 1983, с.9.
11. Белозеров А.В. и др. Тезисы докладов XXXIU совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. Л. "Наука", 1984, с.379.
12. Быковский Ю.А. и др. Девятое Всесоюзное совещание по ускорителям заряженных частиц. Аннотации докладов. ОИЯИ, Р9-84-641, Дубна, 1984, с.7.
13. Флеров Г.Н. и др. Девятое Всесоюзное совещание по ускорителям заряженных частиц. Аннотации докладов. ОИЯИ, Р9-84-641, Дубна, 1984, с.106.

Рукопись поступила в издательский отдел
22 апреля 1985 года