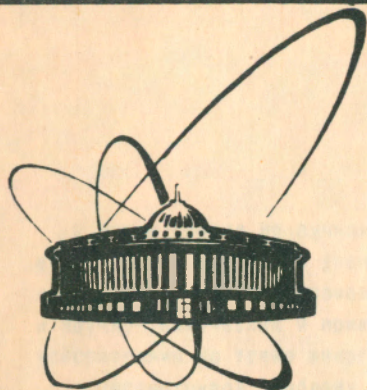


90-37



объединенный
институт
ядерных
исследований
дубна

Б 744

P9-90-37

С.Л.Богомолов, В.Б.Кутнер, Ю.П.Третьяков

ЦИКЛОТРОННЫЕ ИСТОЧНИКИ
МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ

Направлено в Оргкомитет X заседания Всесоюзного семинара по физике и технике интенсивных источников ионов и ионных пучков, Киев, 1990 г.

1990

1. Введение

Исследования на пучках тяжелых ионов в широком диапазоне масс вплоть до пучков ионов урана с энергией от 5-10 до 100-200 МэВ/нуклон предоставляют большие возможности для решения как фундаментальных, так и научно-технических и прикладных задач. Наиболее распространенными ускорителями на такие энергии являются циклотроны.

Рассматривая проблему ускорения ионов и ядер с помощью ускорителей и ускорительных комплексов, приходится прежде всего исходить из возможностей ионных источников и перспектив их развития.

На рис.1 представлены данные по выходу многозарядных ионов (м.з.и.) из источников различных типов. В настоящем обзоре рассматриваются характеристики различных типов ионных источников с точки зрения их использования на циклотронах.

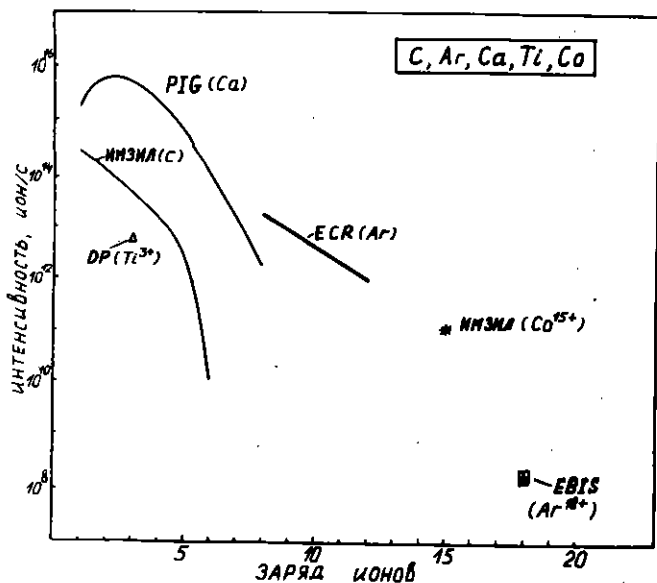


Рис.1. Выход многозарядных ионов из различных источников.

2. Внутренние циклотронные источники ионов

Наиболее широкое распространение на циклотронах получили различные модификации дуговых ионных источников^{/1/}. Ввод их в циклотрон может осуществляться как радиально, так и аксиально через отверстие в полюсе электромагнита циклотрона.

На рис.2 показана головка аксиального источника ионов с катодом прямого накала^{/2/}, используемого на циклотроне У-200 для получения ионов легких элементов (D_2^+ , DH^+ , He^+).

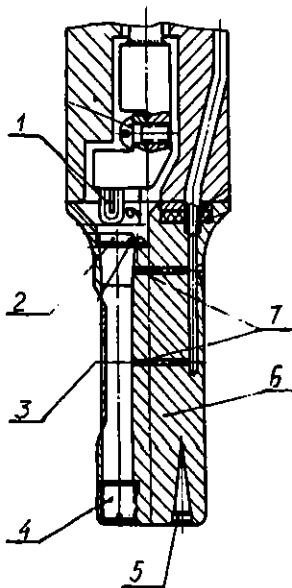


Рис.2. Головка источника легких ионов циклотрона У-200. 1 - катод, 2 - диафрагма, 3 - эмиссионная щель, 4 - антикатад, 5 - канал охлаждения, 6 - анод, 7 - канал ввода газа.

Источники с катодом прямого накала, а также источники с "холодными" катодами использовались в первых экспериментах по ускорению ионов N^{3+} на циклотроне^{/3/}. Источники с "холодными" катодами (РГ-источники), которые отличаются простотой конструкции и компактностью, получили дальнейшее развитие^{/4/}; в них получены ионы C^{5+} , N^{6+} , O^{6+} , Ne^{5+} . Основными недостатками таких источников являются малый срок работы и низкая надежность, а также недостаточная интенсивность пучков ионов. Эти недостатки в значительной степени преодолены в источниках м.э.и. с подогревным катодом и осцилляцией электронов в магнитном поле (ИПК), впервые разработанных в ИАЭ им. И.В.Курчатова^{/5,6/}.

Источник с подогревным катодом^{/5/} был использован на первом циклотроне тяжелых ионов ОИЯИ - У-300 - для получения ионов газообразных веществ^{/7/}. В дальнейшем он был модифицирован для получения м.э.и. твердых веществ, главным образом металлов^{/8/}. На рис.3 схематически

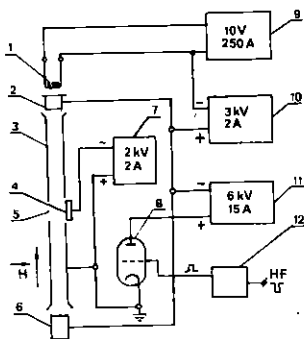


Рис.3. Схема головки ионного источника с катодным распылением рабочего вещества и система электропитания.

не эмиссионной щели (5) ионного источника. При зажигании разряда в камере и наличии отрицательного потенциала на электроде от выпрямителя (7) происходит катодное распыление материала электрода (4) и последующая ионизация распыленных частиц в разряде. Напряжением выпрямителя (7) и регулировкой положения электрода с помощью соответствующего дистанционного механизма осуществляется оптимальная подача ионизируемого рабочего вещества. Источник работает в импульсном режиме синхронно с генератором высококачественного напряжения циклотрона. Этот режим осуществляется с помощью ключа (8), который блоком (12) синхронизируется с высокочастотным генератором.

В испытаниях источника проводилась ионизация ряда элементов вплоть до тория. Результаты исследований источника для получения ионов различных веществ (N, Fe, Ge, Xe, Th) на стенде представлены на рис.4.

Исследования показали, что из источника могут быть получены интенсивные пучки ионов тяжелых элементов, например, импульсный ток ионов Th^{11+} составляет 4,8 мА. В табл.1 представлена часть элементов периодической системы Д.И.Менделеева, ионы которых были получены из источника с катодным распылением рабочего вещества. Значительная часть ионов ускорена на циклотронах ЛЯР ОИЯИ. Так, на циклотроне У-300 ускорены ионы от Li^+ (ток выведенного пучка > 10 мкА) до Bi^{13+} (ток выведенного пучка 0,04 мкА)^{/10/}. На циклотроне У-400 основное внимание уделяется получению пучков ионов разделенных изотопов^{/11/}, здесь до энергии 6 МэВ/нуклон ускорены ионы изотопов ^{26}Mg , ^{48}Ca , ^{49}Ti , ^{50}Ti , ^{53}Cr , ^{54}Cr , ^{58}Fe , ^{60}Ni , ^{70}Zn , ^{76}Ge . Результаты представлены в табл.2.

представлены головка источника м.э.и. циклотрона У-400 ЛЯР ОИЯИ и система его электропитания^{/9/}. Разрядная камера источника (3) размещена в зазоре электромагнита циклотрона. Катод (2) ионного источника подогревается потоком электронов с нити (1), представляющей собой вспомогательный катод прямого накала, питающийся от выпрямителя (9). Электроны ускорены напряжением выпрямителя подогрева (10). При подаче в разрядную камеру газа и включении выпрямителя (11) зажигается разряд. Антикатод (6) находится под потенциалом катода (2), что создает условия для осцилляции первичных и плазменных электронов. Электрод (4), содержащий рабочее вещество, размещается в райо-

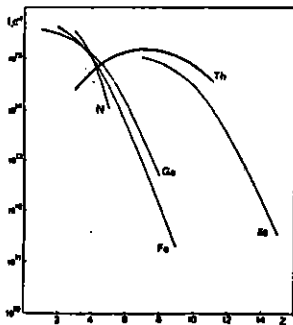


Рис. 4. Выход ионов различных элементов из ИПК.

Таблица 1. Элементы, ионы которых получены из источника с катодным распылением рабочего вещества.

	I	II	III	IV	V	VI	VII
2	${}^7\text{Li}_{\text{эл}}$	${}^9\text{Be}_{\text{д.с}}$	${}^{10}\text{B}_{\text{д.эл}}$	${}^{12}\text{C}_{\text{д.р}}$			
3	${}^{12}\text{Mg}_{\text{д.р}}$	${}^{13}\text{Al}_{\text{д.р}}$	${}^{14}\text{Si}_{\text{д.р}}$	${}^{15}\text{P}_{\text{д.р}}$	${}^{16}\text{S}_{\text{д.с}}$		
4	${}^{20}\text{Ca}_{\text{д.р}}$	${}^{21}\text{Sc}_{\text{д.р}}$	${}^{22}\text{Ti}_{\text{д.р}}$	${}^{23}\text{V}_{\text{д.р}}$	${}^{24}\text{Cr}_{\text{д.р}}$	${}^{25}\text{Mn}_{\text{д.с}}$	${}^{26}\text{Fe}_{\text{д.р}}$
	${}^{29}\text{Cu}_{\text{д.р}}$	${}^{30}\text{Zn}_{\text{д.с}}$	${}^{32}\text{Ge}_{\text{д.р}}$	${}^{34}\text{Se}_{\text{д.р}}$			
5		${}^{40}\text{Cd}_{\text{д.р}}$	${}^{43}\text{In}_{\text{д.р}}$	${}^{50}\text{Sn}_{\text{д.р}}$			
6			${}^{57}\text{La}_{\text{д.с}}$	${}^{72}\text{Hf}_{\text{д.с}}$	${}^{73}\text{Ta}_{\text{д.с}}$	${}^{74}\text{W}_{\text{д.с}}$	${}^{75}\text{Re}_{\text{д.с}}$
			${}^{82}\text{Pb}_{\text{д.р}}$	${}^{83}\text{Bi}_{\text{д.р}}$			
	${}^{90}\text{Th}_{\text{д.р}}$						

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

Способ изготовления электродов:
 р - резание
 т - травление (анодная, точ)
 л - литье, слесарные
 п - плавление в вакууме
 г - горячее прессование в вакууме
 ип - холодное прессование

Исходный материал:
 о - чистый элемент
 д - химическое соединение
 с - сплав
 э - интерметаллид

Переход от ионов одного элемента к ионам другого связан лишь с установкой соответствующего распыляемого электрода. Вместе с тем технология изготовления для каждого элемента, а в случае использования разделенных изотопов для каждого изотопа, является сугубо индивидуальной. Сложной научно-технической задачей является также разработка технологий сбора и регенерации разделенных изотопов для их повторного использования.

Ресурс источника многозарядных ионов определяет продолжительность непрерывного облучения физических мишеней и максимальную интенсивность пучка ускоренных ионов. Управление ионным источником вызывает определенные трудности у операторов циклотрона. Это является следствием того, что с точки зрения управления источник представляет собой нелинейный

Таблица 2. Разделенные изотопы металлов, ускоренные на циклотроне у-400

Ускоряемый ион	Исходное вещество	Содержание изотопа в электроде, ат. %	Вещество после регенерации	Интенсивность внутреннего пучка, част/сек
$^{26}\text{Mg}^{3+}$	MgO	30	MgO	$1,2 \cdot 10^{13}$
$^{48}\text{Ca}^{5+}$	CaO	20	CaO	$2,4 \cdot 10^{12}$
$^{49}\text{Tl}^{5+}$	Tl ₂ O	11	Tl ₂ O	$1,0 \cdot 10^{13}$
$^{50}\text{Tl}^{5+}$	Tl ₂ O	10	Tl ₂ O	$9,6 \cdot 10^{12}$
$^{53}\text{Cr}^{5+}$	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	-	$1,0 \cdot 10^{12}$

многосвященный стохастический объект с дрейфующими во времени характеристиками. С целью получения заданной интенсивности пучка ионов и ее стабилизации при максимальном сроке службы источника разработана микропроцессорная система контроля параметров и автоматического управления режимом работы источника^{12/}. Основные функции микропроцессорной системы:

1. Измерение и отображение параметров режима ионного источника.
2. Проверка и предотвращение аварийных ситуаций.
3. Автоматическая программная настройка источника на рабочий режим.
4. Получение заданного (или максимального) тока пучка настройкой режима ионного источника.
5. Запоминание текущих параметров режима источника и их стабилизация.
6. Запоминание и стабилизация тока пучка.
7. Автоматическое выключение технологических подсистем ионного источника.
8. Сбор данных о режиме ионного источника и их печать в виде таблицы.
9. Интерактивный режим.

Таблица параметров источника и мнемосхема с системами питания представлена на рис.5. Основные параметры режима отображаются также в виде 7 горизонтальных линейных шкал.

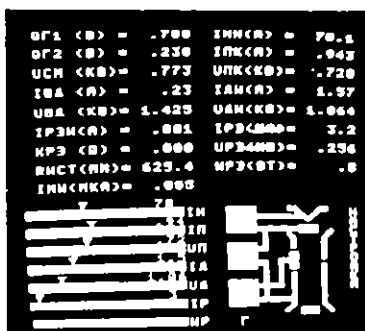


Рис.5. Изображение на экране телевизионного дисплея основных параметров источника многозарядных ионов.

создания на основе лазера циклотронного источника м.з.и. /14/. Исследования были проведены на циклотроне У-200. Для проводки лазерного луча от неодимового или CO_2 -лазера к мишени, устанавливаемой в центре циклотрона, использовался канал для вертикального ионного источника. Результаты работ по получению и ускорению ионных пучков из лазерных источников представлены в табл.3 и на рис.6.

В источниках с "холодными" катодами для получения пучков ионов твердых веществ используется способ подачи рабочего вещества в разряд путем его расплывления "обратными" ионами /13/. Такой же способ был применен на циклотронах ЛЯР ОИЯИ У-200 и ИЦ-100 для получения ионов твердых веществ из газоразрядного ИПК. Были получены пучки ионов Li^{2+} , V^{2+} , F^{4+} , Na^{4+} , Cl^{4+} с интенсивностями на конечных радиусах ускорения до нескольких мкА. В качестве рабочих веществ использовались кристаллы LiF , NaCl и нитрид бора.

В ЛЯР ОИЯИ проводились исследования характеристик лазерной плазмы с целью

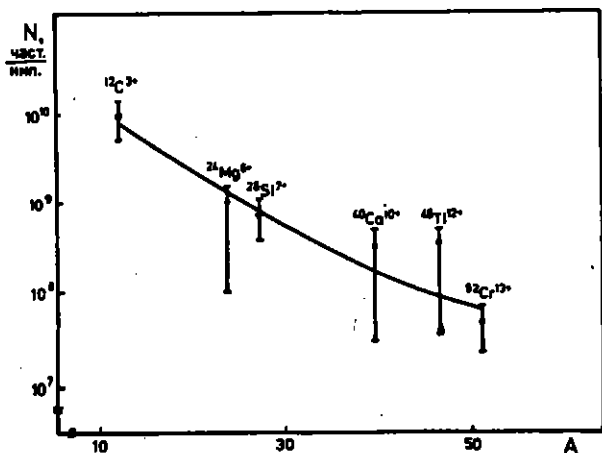


Рис.6. Интенсивности пучков ионов элементов от С до Сг, ускоренных на циклотроне У-200, из лазерного источника.

Таблица 3. Параметры пучков ионов, ускоренных на циклотроне У-200, из лазерного источника

Характеристики лазера					Направление плазменного факела к магнитному полю	Параметры пучков, ускоренных на циклотроне		
Тип	λ , мкм	Φ , Вт/см ²	W, Дж	f, Гц		A, Z	I, с ⁻¹	τ , мкс
CO ₂	10,6	10 ⁹	0,4	1	под углом	C ³⁺ - Cr ¹³⁺	10 ¹⁰ -10 ⁷	10-1
Nd	1,06	5·10 ⁹	0,04	25	вдоль	Li ³⁺ - Ta ⁴⁺	8·10 ¹⁰	2

Лазерный источник дает пучки многозарядных ионов в виде коротких импульсов тока (длительность импульса ≤ 10 мкс), что открывает перспективы его использования для инжекции ускоренных пучков ионов в накопители и охладители.

3. Внешняя инжекция пучков ионов в циклотроны

В настоящее время широкое распространение получили системы внешней инжекции пучков в циклотроны^{/15/}, которые дали новое качество многим ускорителям. Системы внешней инжекции открывают возможности использования на циклотронах новых типов источников (ЭЦР, EBIS и другие), а также возможности дальнейшего развития и усовершенствования традиционных циклотронных источников дугового типа. Использование внешней инжекции предъявляет определенные требования к качеству извлекаемых из источников пучков с точки зрения их эффективной транспортировки от источника до центральной области циклотрона. В табл.4 приведены основные характеристики плазмы ионных источников и извлекаемых ионных пучков.

Таблица 4. Основные характеристики плазмы ионных источников и извлекаемых ионных пучков

Тип источника	Частота импульс., Гц	Длительн. имп., мс	Te, эВ	$n_e \tau$, см ⁻³ ·с	Энергетич. разброс, эВ	Нормализованный эмиттанс
ИПК	100	1-3	10 ²	10 ⁹	1-20	1,0
ЭЦР	непрерывный		5·10 ³	10 ¹⁰	20-200	1,0
ИМЗИЛ	1-25	0,005	30-60	10 ¹¹	150	10,0
EBIS	1	0,05	$E_e=10^4$	10 ¹¹	1-10	0,6
DP	100	1	10	10 ⁸	10-100	0,6

В ЛЯР ОИЯИ была разработана и создана система внешней инжекции пучка для циклотрона У-200^{/16/}. На этапе запуска системы использовался высокочастотный источник ионов, из которого был получен пучок ионов He⁺ с интенсивностью до 100 мкА и эмиттансом 130 мм·мрад. С его помощью была проведена наладка системы. Эффективность транспортировки пучка от

анализирующего магнита до конечного радиуса ускорения составила 8%. В дальнейшем использовался источник типа дуопигатрон, аналогичный описанному в работе^{/17/}. Использование этого источника обеспечило проведение физических экспериментов на пучках ускоренных ионов He^+ и D_2^+ с достаточно высокими интенсивностями, а также изучение особенностей транспортировки в канале внешней инжекции и захвата в ускорение пучков с интенсивностью до 1 мА.

В настоящее время в лаборатории разработан инжектор с дуговым источником многозарядных ионов^{/18/}. Использование этого источника позволит получать ускоренные пучки ионов в диапазоне от He до Ar, в том числе ионы твердых веществ при использовании источника с катодным распылением рабочего вещества. Блок-схема инжектора представлена на рис.7.

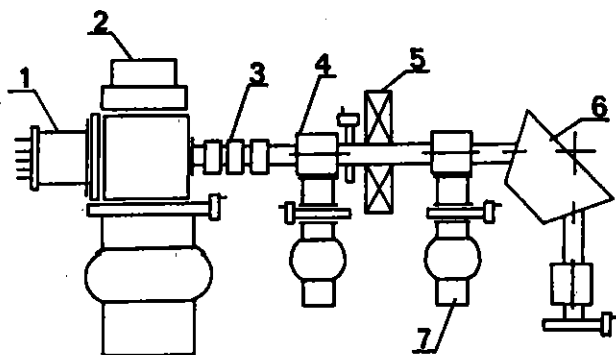


Рис.7. Основные элементы инжектора. 1 - ионный источник, 2 - электромагнит, 3 - триплет квадрупольных линз, 4 - блок диагностики, 5 - магнитная линза, 6 - анализирующий магнит, 7 - вакуумный насос.

Источник ионов для инжектора спроектирован на основе ИПК^{/5/} с использованием опыта работы с циклотронными источниками с катодным распылением рабочего вещества. Головка источника находится на высоком положительном потенциале (от 11 до 20 кВ в зависимости от типа инжектируемых ионов) и размещена в зазоре С-образного электромагнита с полем в центре до 4 кЭ. Извлечение и начальное формирование пучка осуществляется трехэлектродной системой по схеме "ускорение-замедление". Для компенсации отклоняющего действия магнитного поля введен электростатический компенсатор (фильтр Вина).

Проведены тестовые опыты по инжекции пучка ионов He^+ из внешнего инжектора в циклотрон У-200. В настоящее время проводятся исследования с целью оптимизации характеристик пучка на входе в канал внешней инжекции.

В результате 20-летних разработок и исследований источники ионов с электронно-циклотронным резонансом (ЭЦР) стали достаточно эффективным инструментом для получения интенсивных ($> 10^{11}$ ионов в секунду) пучков высокозарядных ($z > 15$) ионов. В настоящее время создано более 30 источников ионов для ускорителей и исследований по атомной физике^{/19,20/}.

В ЭЦР-источнике ионов с помощью суперпозиции продольного магнитного поля пробочной конфигурации и радиального мультипольного (в основном секступоль) магнитного поля создается так называемая В-минимум-структура магнитного поля. Если в плазму, находящуюся в такой конфигурации, вводится соответствующая микроволновая мощность, то электроны плазмы ускоряются при прохождении точек поверхности, на которой лармовская частота электронов равна частоте микроволнового генератора. В результате стохастического нагрева при многократном пересечении поверхности резонанса их энергия возрастает до нескольких кэВ. Благодаря медленной диффузии плазмы вдоль продольной оси структуры достигается большое время взаимодействия ионов с "горячими" электронами. Таким образом ионы достигают высокозарядных состояний. Современные ионные источники состоят из двух камер ионизации. В первой образуется холодная плазма, которая дрейфует во вторую ступень, в которой осуществляется многоступенчатая ионизация. В настоящее время из таких источников получают также ионы твердых веществ. В таблице 5 представлены результаты стендовых исследований ЭЦР-источника (16 ГГц, 10 кВт) в группе Р. Желлера в Гренобле^{/19/}.

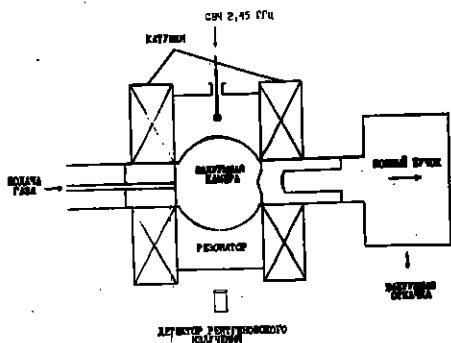


Рис.8. Схема макета источника с ЭЦР-нагревом электронов на частоте 2,45 ГГц.

Источники ионов ЭЦР-типа разрабатываются в СССР в Университете Дружбы народов им. П. Лумумби^{/21/} и в ЛЯР ОИЯИ^{/22/}. На рис.8 показана схема макета источника ионов с ЭЦР-нагревом электронов на частоте 2,45 ГГц, разрабатываемого для циклотрона У-200 с целью получения пучков многозарядных ионов легких элементов с отношением массы к заряду в диапазоне $A/Z = 2-5$. На рис.9 приведено зарядовое распределение и показана возможность получения ионов N^{3+} .

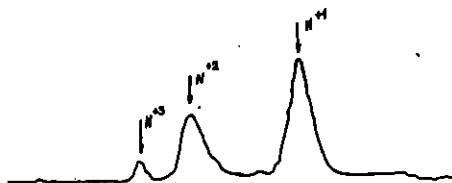


Рис.9. Зарядовый спектр ионов азота из макета ЭЦР-источника.

Таблица 5. Выход ионов из ЭЦР-источника ионов

Заряд ионов	Ток ионов в мкА			
	$^{16}_O$	$^{40}_{Ar}$	$^{84}_{Kr}$	$^{130}_{Xe}$
6+	300			
7+	60			
8+	10	300		
9+		200		
11+		120		
13+		35		
16+		2	50	
17+		0,1	40	50
18+		0,005	30	40
20+			12	40
24+			3	20
26+			1	10
28+			0,1	3
30+				2
32+				1
34+				0,1

4. Эффективность ионных источников

Для получения пучков ускоренных ионов редких и радиоактивных изотопов необходимы высокоэффективные ионные источники. Это требование становится особенно важным при использовании дорогостоящих изотопов, например ^{48}Ca или высокорadioактивных, таких, как ^{14}C . При ускорении ионов токсичных элементов, например, Be , в случае высокой эффективности ионного источника можно использовать рабочие материалы с более низким содержанием ускоряемого элемента.

Основные работы с ионными источниками на циклотроне У-400 были связаны с получением ускоренных пучков ионов обогащенных изотопов от ^{26}Mg до ^{76}Ge .

Пучки ионов углерода - 14 были ускорены на циклотроне У-300 с использованием радиоактивного газа $^{14}\text{CO}_2$. В табл.6 и на рис.10 проводится сравнение эффективности использования некоторых рабочих веществ в дуговом и ЭЦР-источниках ионов /23/.

Таблица 6. Сравнительные данные эффективности использования некоторых рабочих веществ в дуговом и ЭЦР-источниках ионов

Ионный источник	Ион	$\Delta m/\Delta t$, мг/час	Q_3 , см ⁻³ /мин	E_{is}	E_t
ИПК	$^{14}\text{C}^{2+}$	-	0,03	$1,5 \cdot 10^{-2}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$
	$^{26}\text{Mg}^{3+}$	4,4	-	$5,0 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$
	$^{40}\text{Ar}^{8+}$	-	0,6	$5,5 \cdot 10^{-5}$	$3,3 \cdot 10^{-7}$
	$^{48}\text{Ca}^{6+}$	4,0	-	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$
	$^{132}\text{Xe}^{13+}$	-	0,4	$1,0 \cdot 10^{-4}$	-
ЭЦР	$^{13}\text{N}^+$	-	-	$2,5 \cdot 10^{-1}$	-
	$^{40}\text{Ar}^{8+}$	-	0,6	$3,0 \cdot 10^{-4}$	-
	$^{40}\text{Ca}^{11+}$	2,1	-	$6,0 \cdot 10^{-4}$	-
	$^{48}\text{Ca}^{6+}$	1,8	-	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-5}$

В табл.6. $E_{is}^1 = \frac{N_i}{N_o}$ и $E_t^1 = E_{ac}^1 \cdot E_{is}^1$,

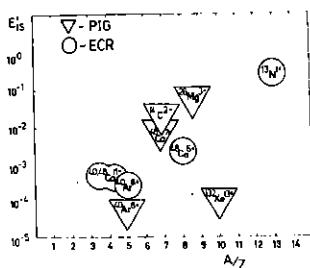


Рис.10. Сравнение эффективности использования некоторых рабочих веществ в ИПК- и ЭЦР-источниках ионов.

где E_{1a}^1 - эффективность использования рабочего вещества при получении из ионного источника пучка ионов i -й зарядности; N_0 - число атомов рабочего вещества, подаваемого в разряд в единицу времени; N_1 - число ионов i -го заряда в пучке; E_c^1 - полная эффективность использования рабочего вещества; E_{ac}^1 - эффективность ускорения и транспортировки пучка.

5. Заключение

Исследования и опыт использования дугового (ИПК) и ЭЦР-ионных источников для циклотронов показывают, что с их помощью могут быть успешно решены задачи эффективного получения и ускорения пучков ионов в широком диапазоне масс и энергий. Дуговой ионный источник позволяет получать более интенсивные пучки ионов легких элементов, а ЭЦР-источник дает существенное повышение зарядности тяжелых ионов, что обеспечивает получение более высоких энергий ускоренных пучков.

Лазерный источник ионов является перспективной разработкой для импульсных ускорителей, электростатических ускорителей, а также для инъекции ускоренных пучков в накопители и охладители тяжелых ионов.

Литература

1. Н.И.Веников, В.Б.Кутнер, А.С.Пасяк, ОИЯИ, Р9-82-87, Дубна, 1982.
2. Т.Таут, И.А.Шелаев, Г.М.Соловьева, ОИЯИ, 9-4368, Дубна, 1969.
3. R.J.Jones and A.Zucker, Rev.Sci.Instr., 1954, v.25, N 6, p.562.
4. Т.Yamaya, Nucl.Instr. & Meth. 1984, v.226, N 2/3, p.219.
5. М.М.Морозов, Б.Н.Маков, М.С.Иоффе. Атомная энергия 1957, т.2, № 3, с.272.
6. Б.Н.Маков. В кн.: Труды X Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна 21-23 октября 1986 г. ОИЯИ, Д9-87-105, т.11, с.3.
7. А.С.Пасяк и др., ПТЭ 1963, № 5, с.23.
8. Ю.П.Третьяков и др., ОИЯИ, Р7-4477, Дубна, 1969. Атомная энергия 1970, т.28, вып.5, с.423.
9. Ю.П.Третьяков, В.Б.Кутнер, А.С.Пасяк, ОИЯИ, Р7-84-774, Дубна, 1984.
10. Ю.П.Третьяков и др. В кн.: Труды УП Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна 14-16 октября 1980 г., т.1, с.81, Дубна 1981.
11. С.Л.Богомолов и др., В кн.: Труды УШ Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна 19-21 октября 1982 г. т.1, с.112, Дубна 1983.
12. V.V.Kutner et al., In: Int. Conference on Ion Sources. July 10-14 1989, Berkeley, USA. Program & Abstracts LBL-27178, July 1989, p.152.

13. T.Tanabe, Nucl.Instr. & Meth. 1984, v.221, N 3, p.481.
14. Ю.А.Быковский и др., ЖТФ, 1988, т.58, в.7, с.1291.
15. P.J.Clark, C.M.Lyneis, in: Proc. of the 11th Intern. Conf. on Cyclotrons & their Appl. Tokyo, October 13-17, 1986, p.499.
16. С.Л.Богомолов и др., ОИЯИ, Р9-88-641, Дубна, 1988.
17. Ю.Н.Антонов, Л.П.Зиновьев, В.П.Рошевский, Атомная энергия, 1960, т.8, вып.5, с.454.
18. В.Б.Кутнер и др., В кн.: II Международное совещание по циклотронам и их применению. г.Бехине, ЧССР, 29 мая - 3 июня 1989 г. ОИЯИ Д9-89-708, Дубна 1989.
19. Proposal for a Heavy Ion ECR-Source at PSI-Philips Cyclotron. Paul Scherrer Institut PSI-Bericht Nr.40, Oktober 1989. Editors: I.Kern, H.Gaggeler, P.Schmelzbach.
20. R.Geller, in: Proc. of the 11th Intern. Conf. on Cyclotrons & their Appl. Tokyo, October 13-17, 1986, p.699.
21. К.С.Головановский, ПТЭ 1985, № 5, с.7.
22. А.А.Ефремов, В.Б.Кутнер. Исследование макета источника ионов с СВЧ-нагревом электронов на частоте 2,45 ГГц. ОИЯИ, Р9-88-895, Дубна 1988.
23. V.V.Kutner et al., in: International Conference of Ion Sources. July 10-14, Berkeley, USA. Program & Abstracts, LBL-27178, July 1989, p.84.

Рукопись поступила в издательский отдел
18 января 1990 года.