

СОЗДАНИЕ ЦИКЛИЧЕСКОГО ИМПЛАНТАТОРА ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ ИЦ-100

Г.Н.Флеров, А.М.Андрянов, С.Л.Богомолов, В.В.Болтушкин, П.Г.Бондаренко, Буй Бинь Тхуан, Г.Г.Гульбекян, А.И.Иваненко, Э.Л.Иванов, Ю.А.Иванов, Б.А.Кленин, И.В.Колесов, В.Б.Кутнер, Е.А.Минин, А.М.Мордуев, Р.Ц.Оганесян, С.В.Пашенко, К.Хавличек, В.А.Чугреев

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Ускоренные пучки тяжелых ионов вследствие своей уникальности являются прекрасным инструментом для исследований в целом ряде научных и прикладных направлений. Благодаря тому, что удельные потери энергии тяжелых ионов в сотни раз выше удельных потерь для легких частиц, возникает возможность их применения во многих перспективных областях науки и техники [1,2,3]. В течение последних 10 лет в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ, наряду с работами по синтезу новых элементов и экзотических ядер, изучению механизма ядерных реакций, на циклотронах У-300 и У-400 ведутся работы по радиационному материаловедению, налажено производство ядерных фильтров, проходят эксперименты по ионной обработке материалов с целью создания микроструктур с заданными характеристиками.

Физические эксперименты требуют получения тяжелых ионов с энергиями 5-10 МэВ/нуклон, что приводит как к необходимости создания ускорителей сложных конструкций (габариты, вес, мощность питания и т.д.), так и к усложнению радиационной обстановки. Вместе с тем для большинства научно-прикладных направлений достаточно иметь тяжелые ионы с энергией 1-2 МэВ/нуклон. За последнее время эти исследования настолько развились, что возникла мысль о создании специализированного ускорителя, позволяющего проводить систематические работы во всех трех указанных направлениях. Исходя из возможностей существующих ионных источников, а также опыта создания циклотронов тяжелых ионов, выбран ускоритель циклотронного типа - циклический имплантатор ИЦ-100.

Ускоритель создан на базе серийного электромагнита СП-57. За счет увеличения диаметра полюса до 1050 мм и повышения уровня среднего магнитного поля до 19,2 кГс обеспечен энергетический фактор $K=40$, что позволяет ускорять ионы в диапазоне от ^{11}B до ^{40}Ar с отношением массы к заряду иона $A/Z = 5,3 \pm 0,0$ до энергии 1-1,25 МэВ/нуклон.

Основные технические характеристики ИЦ-100

Вес магнита	43 т
Потребляемая мощность магнита	130 кВт
Число ампер-витков основной обмотки	170000
Номинальный ток	675 А
Стабильность тока возбуждения	$5 \cdot 10^{-4}$
Среднее магнитное поле	19,2 кГс
Количество секторов	4 (по 56°)
Зазор в долине	110 мм
Минимальный зазор в холме	20 мм
Количество дуантов	2 (по 34°)
Напряжение на дуантах	50-70 кВ
Колебательная мощность генератора	25 кВт
Частотный диапазон	20,4-20,9 МГц

Номер гармоники ускоряющего напряжения	4 (6)
Вакуумный объем	$1,5 \text{ м}^3$
Скорость вакуумной откачки	5250 л.с^{-1}
Предельный вакуум в камере (без ионного источника и ВЧ-напряжения на дуантах)	$7 \cdot 10^{-7} \text{ торр}$
Рабочий вакуум в камере	$1,0 \cdot 10^{-5} \text{ торр}$
Способ вывода пучков	<ul style="list-style-type: none"> - электростатический дефлектор - обдирка на углеродной фольге

В целях существенного упрощения конструкции и облегчения условий эксплуатации ускорителя, магнитное поле ИЦ-100 сформировано с высокой точностью с применением только железных масс /4/, что позволило отказаться от системы токовой коррекции. Радиальное распределение среднего магнитного поля (отличие от изохронного во всей рабочей области не более 10 Гс) и распределение флаттера магнитного поля представлено на рис.1. Изохронность поля в рабочей области обеспечивает малый фазовый сдвиг в процессе ускорения, а флаттер магнитного поля - жесткую магнитную фокусировку, начиная с первых оборотов ($\Delta \sin \Phi \leq 0,05$ и $\dot{\nu}_z \sim 0,3+0,35$). Первая гармоника поля $\sim 10 \text{ Гс}$ не приводит к заметной децентровке пучка из-за небольшого числа (максимум 50) оборотов пучка.

Формирование магнитного поля в основной рабочей области ускорения ионов осуществлялось комбинированным способом. Грубое шиммирование магнитного поля было осуществлено по результатам модельных измерений кольцевыми шиммами, выполненными на внутренней поверхности секторов. Тонкое шиммирование осуществлялось изменением угловой протяженности сектора путем профилирования съемной боковой накладки.

Для получения ионов использован вертикальный ионный источник дугового типа с косвенным подогревом катода, разработанный для циклотрона У-200 /5/. Источник вводится в центральную область ускорителя (рис.2) через аксиальное отверстие в верхней балке и полюсе магнита. Наличие такого отверстия позволит в будущем осуществить внешнюю инжекцию пучка в центральную область /6/. Это даст возможность, с одной стороны, увеличить интенсивность пучка при использовании существующего дугового источника (улучшение условий фазового захвата пучка и уменьшение давления в вакуумной камере), а с другой стороны - расширить диапазон ускоряемых ионов за счет применения ионных источников новых типов (ЕСР, лазерный и др.).

Резонансная система ИЦ-100 состоит из двух коаксиальных линий, укороченных емкостью дуантов, соединенных в центре, и представляет собой полуволновый резонатор /7/. За счет создания высокого волнового сопротивления резонансной линии достигнуто уменьшение ее геометрической длины, а также мощности, выделяющейся в плакировках резонаторов. Последнее позволило отказаться от их охлаждения. Корпус резонатора выполнен из нержавеющей стали, плакированной медью. Хороший тепловой контакт медной плакировки с внутренней поверхностью резонатора достигнут применением современной технологии соединения двух разнородных металлических поверхностей - сваркой взрывом. В качестве генератора ВЧ-напряжения использован типовой передатчик с двухтактным выходом. Мощность генератора 25 кВт, охлаждение воздушное, диапазон частот 3+24 МГц. Связь с резонансной системой индуктивная, регулируемая.

Основные параметры резонансной системы

Диапазон рабочих частот	20,4±20,9 МГц
Волновое сопротивление резонансной линии	120 Ом
Характеристическое сопротивление резонансного контура	36 Ом
Суммарная емкость дуантов	220 пФ
Добротность системы	3800
Мощность потерь	10±25 кВт

Система высоковакуумной откачки ИЦ-100, имеющего вакуумный объем 1500 л, включает в себя один диффузионный вакуумный агрегат ВА-8-7 на камере циклотрона и два агрегата АВП-2, по одному на каждом из ВЧ-резонаторов. Суммарная скорость действия средств откачки по азоту составляет величину 5250 л.с^{-1} . Время откачки циклотрона от атмосферного давления до $P=1 \cdot 10^{-5}$ торр не превышает 45 минут. Основная газовая нагрузка на вакуумную систему создается потоком газа из источника и составляет величину от 1 до $3 \text{ см}^3 \cdot \text{мин}^{-1}$. Зависимость относительной интенсивности пучка ионов $^{40}\text{Ar}^{+7}$ от давления в камере циклотрона, представленная на рис.3, показывает, что для 50%-го прохождения пучка до конечного радиуса давление остаточного газа должно быть не хуже $1 \cdot 10^{-5}$ торр. Рабочий вакуум в режиме ускорения находится в пределах $P=(5 \cdot 10^{-6} \div 1 \cdot 10^{-5})$ торр.

В процессе пуска наладочных работ на циклотроне ИЦ-100 ускорены ионы ряда элементов от ^{12}C до ^{40}Ar . Некоторые параметры ускорения представлены в табл.1, где A – масса иона, Z – заряд иона, f – рабочая частота ВЧ-генератора, B – уровень среднего магнитного поля, N – номер гармоники ускоряющего напряжения, E – полная энергия иона на конечном радиусе ускорения $R=46 \text{ см}$, $I_{\text{вн}}$ – интенсивность пучка на конечном радиусе. Применение ионного источника с распылением рабочего вещества позволило получить пучки ионов $^{23}\text{Na}^{+4}$ и $^{35}\text{Cl}^{+4}$ из кристалла NaCl .

Во всей области ускорения пучок лежит в медианной плоскости и имеет вертикальный размер, не превышающий половины рабочей апертуры циклотрона. Радиальный размер пучка на конечном радиусе составляет величину $\Delta r \sim 5 \div 7 \text{ мм}$ (рис.4).

Вывод ионов из ИЦ-100 осуществлен двумя способами: с помощью электростатического дефлектора и обдиркой на углеродной фольге. Схема вывода представлена на рис.5. Дефлектор (I) с угловой протяженностью 28° и радиальной апертурой 10 мм расположен в долине циклотрона. Вертикальный профиль потенциальной и заземленной пластин выбран плоским. Минимальный радиус установки дефлектора 425 мм, диапазон перемещения по радиусу – 150 мм. Конструкция дефлектора смонтирована на фланце вакуумной камеры, что позволяет оперативно извлекать его для ревизии. Вследствие малой рассеиваемой мощности водяное охлаждение дефлектора отсутствует. В качестве источника высокого потенциала использована выпрямительная установка ВС-50-50. Рабочее напряжение дефлектора находится в пределах (30±35) кВ.

Для коррекции положения орбиты пучка на входе в дефлектор в противоположной от него долине установлена пара азимутальных корректирующих катушек. Оптимизация вывода с их помощью повысила эффективность прохождения пучка через дефлектор на (15±20)% и приблизила ее к 70%.

Таблица 1
Параметры ускорения ионов на ИЦ-100

Ион	A/Z	$B/\text{кВ}$	$f/\text{МГц}$	N	$E/\text{МэВ}$	E/A	$I_{\text{вн}}/\text{мкА}$	Рабочее вещество
$^{12}\text{C}^{+2}$	600	20,0	20,43	4	134	11	$75 \cdot 10^3$	CO_2
$^{16}\text{O}^{+4}$	533	18,30	20,93	4	95	12	$12 \cdot 10^3$	CO_2
$^{23}\text{Na}^{+4}$	5,50	18,87	20,93	4	26,9	12	$27 \cdot 10^3$	NaCl
$^{35}\text{Cl}^{+4}$	5,75	19,26	20,43	4	28,6	12	$10 \cdot 10^3$	NaCl
$^{40}\text{Ar}^{+7}$	8,75	19,54	20,43	6	178	0,5	$40 \cdot 10^3$	CO_2 , NaCl

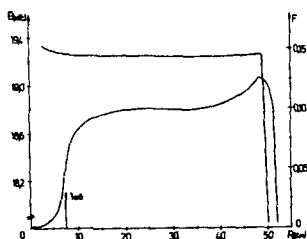


Рис. 1. Радиальное распределение флаттера и среднего магнитного поля ИЦ-100.

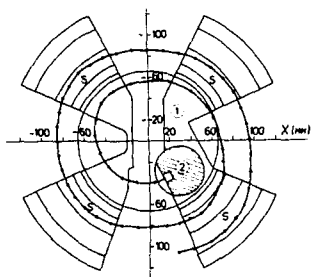


Рис. 2. Центральная область ИЦ-100 в плане и траектория иона $^{40}\text{Ar}^{+7}$ на первых оборотах. 1 - съемная центральная накладка диаметром 130 мм, 2 - вертикальный ионный источник.

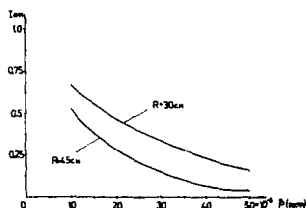


Рис. 3. Зависимость относительной интенсивности пучка ионов $^{40}\text{Ar}^{+7}$ от давления в камере циклотрона.

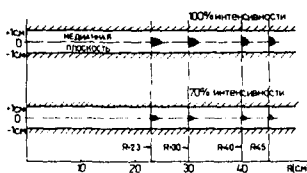


Рис. 4. Автограф пучка $^{40}\text{Ar}^{+7}$ на разных радиусах ускорения.

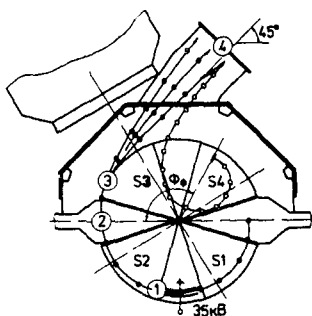


Рис. 5. Схема вывода ионов из циклотрона ИЦ-100.

В ряде прикладных задач, в том числе в производстве ядерных фильтров, требуется облучение пучком тяжелых ионов широких (до нескольких десятков сантиметров) мишеней. Использование особенностей формирования магнитного поля ИЦ-100, а именно: существования высокоградиентной (~ 50 Тл/м) области рассеянного поля (2)+(3) (рис.5) и его сильно дефокусирующего воздействия на отклоненный пучок, позволило решить задачу получения на мишени (4), отстоящей на 0,5 м от выводного фланца камеры циклотрона, широкого пучка (~ 300 мм) без применения традиционных схем и элементов пучковой оптики. Интенсивность пучка на мишени составила величину $\sim 50\%$ от интенсивности внутреннего пучка циклотрона.

Вывод обдиркой реализован таким образом, что пучок ионов выводится в тот же канал, куда попадает пучок, выведенный с помощью дефлектора. Сечение выведенного пучка вписывается в круг диаметром 30 мм, что вполне пригодно для его использования или дальнейшей транспортировки. Эффективность вывода зависит от сорта иона, коэффициента перезарядки и для некоторых выведенных обдиркой ионов указана в таблице 2.

В настоящее время на канале выведенного пучка ИЦ-100 смонтирована и налажена установка, с помощью которой на пучках ионов $^{40}\text{Ar}^{+7}$ и $^{22}\text{Ne}^{+4}$ с энергиями (I,I+I,2) МэВ/н и интенсивностями $5 \cdot 10^{11} + 5 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}$ соответственно, а также ионов $^{35}\text{Cl}^{+4}$ с энергией 0,5 МэВ/н и интенсивностью $6 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}$ проведены облучения полимерных материалов для ядерных фильтров. Показана высокая эффективность ускорителя ИЦ-100 для крупномасштабного производства ядерных фильтров. Получены опытные партии ядерных фильтров в широком диапазоне диаметров пор и толщин используемой для этой цели полимерной пленки. На пучках ионов $^{40}\text{Ar}^{+7}$ и $^{22}\text{Ne}^{+4}$ с энергиями (I,I+I,2) МэВ/нуклон и интенсивностями $(10^{12} + 10^{13}) \text{ с}^{-1}$ соответственно проведены исследования радиационного упрочнения различных металлов.

Созданный циклический имплантатор ИЦ-100 является первым в мире ускорителем циклотронного типа, предназначенным для проведения прикладных исследований на пучках тяжелых ионов. Он отличается компактностью, надежностью в работе, простотой в управлении и является абсолютно безопасным в отношении радиации. Имплантатор ИЦ-100 может явиться основой при разработке целой серии подобных машин, для размещения которых требуется не более 150 м^2 площади без дополнительной биологической защиты и суммарной потребляемой мощности около 150 кВт.

Л и т е р а т у р а

1. Флеров Г.Н.-Вестник АН СССР, 1984, № 4, с.35.
2. Берени Д.-ЭЧАЯ, 1979, т.10, в.2, с.356.
3. Fischer B.E., R.Spohr.-Reviews of Modern Physics, 1983, v.55, p.267.
4. Андриянов А.М. и др. ОИЯИ, 9-85-598, Дубна, 1985.
5. Гикал Б.Н. и др. ОИЯИ, 9-83-311, Дубна, 1983.
6. Ryckewaert G.H.Proc.of the IX Int.Conf.on Cycl.and their Appl.,Caen,France,1981,p.241.
7. Андриянов А.М. и др. ОИЯИ,9-85-532, Дубна, 1985.

Таблица 2
Параметры ионов при выводе
из ИЦ-100 обдиркой

Ион	A/Z ₁	W МэВ	W/A МэВ/н	Z ₂	K %
$^{12}\text{C}^{+2}$	6,00	13,4	1,1	+4	15
				+5	70
				+6	15
$^{16}\text{O}^{+3}$	5,33	19,5	1,2	+5	5
				+6	45
				+7	45
				+8	5
$^{22}\text{Ne}^{+4}$	5,50	26,9	1,2	+7	22
				+8	50
				+9	22
$^{40}\text{Ar}^{+7}$	5,71	46,3	1,1	+12	25
				+13	25
				+14	15
				+15	4