

**сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна**

9-86-785

**Г.Г.Гульбеян, Б.А.Кленин, А.М.Мордуев,
Р.Ц.Оганесян, К.Хавличек, В.А.Чугреев**

**ПОЛУЧЕНИЕ ВЫВЕДЕННЫХ ПУЧКОВ
НА ЦИКЛИЧЕСКОМ ИМПЛАНТАТОРЕ
ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ ИЦ-100**

1986

В настоящее время на циклическом имплантаторе тяжелых ионов ИЦ-100 осуществлено ускорение ионов до энергии ~ 1 МэВ/нуклон в диапазоне $A/Z = 5,33 \div 6,00$ (A — масса иона, Z — заряд иона) от $^{12}\text{C}^{+2}$ до $^{40}\text{Ar}^{+7}$ с интенсивностями внутренних пучков $7,5 \cdot 10^{13} \div 1 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}$.

Вывод ионов из циклотрона осуществлен двумя способами: с помощью электростатического дефлектора и методом обдирки на углеродной фольге. Схема вывода представлена на рис. 1. Численное моделирование вывода пучка осуществлялось на ЭВМ путем решения уравнений движения ионов ^{2/} в реальном магнитном поле методом Рунге-Кутты четвертого порядка. Радиальное распределение магнитного поля ИЦ-100 за конечным радиусом ускорения показано на рис. 2.

Дефлектор, конструкция которого представлена на рис. 3, с угловой протяженностью 28° и радиальной апертурой 10 мм расположен в доли-

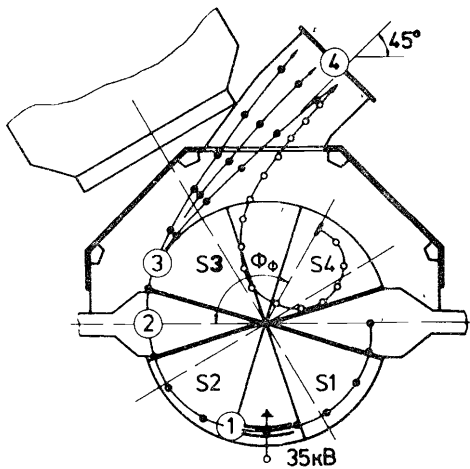


Рис. 1. Схема вывода ионов из циклотрона ИЦ-100.

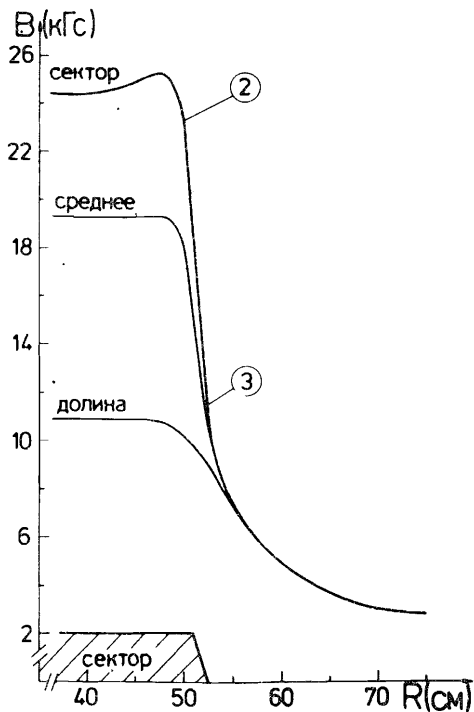


Рис. 2. Радиальное распределение рас-
сеянного магнитного поля.

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
БИБЛИОТЕКА

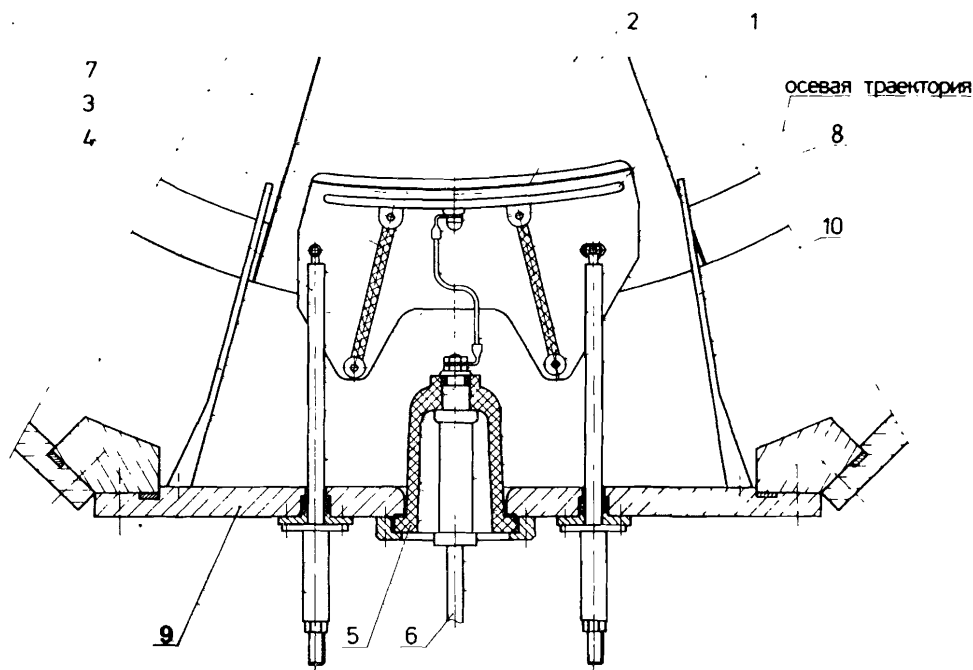


Рис. 3. Конструкция электростатического дефлектора: 1 — потенциальная пластина, 2 — заземленная пластина, 3 — несущий изолятор, 4 — шток перемещения выхода дефлектора, 5 — изолятор ввода отклоняющего напряжения, 6 — высоковольтный ввод, 7, 8 — сектора, 9 — фланец камеры циклотрона, 10 — входной экран.

не циклотрона, ось которой перпендикулярна оси резонансной системы. Вертикальный профиль потенциальной и заземленной пластин выбран плоским, а их радиальная кривизна соответствует кривизне центральной траектории пучка ионов в дефлекторе. Вследствие малой угловой протяженности дефлектора кривизна его пластин в горизонтальной плоскости с достаточной точностью описывается дугами окружностей радиусами $(\rho_0 + 5)$ мм и $(\rho_0 - 5)$ мм, где ρ_0 — радиус осевой траектории ионов в дефлекторе. Потенциальная и заземленная пластины выполнены из листовой меди толщиной 5 и 1,5 мм соответственно, высота потенциальной пластины составляет 35 мм. Минимальный возможный радиус установки дефлектора — 425 мм, диапазон перемещения по радиусу — 150 мм. Вследствие малой рассеиваемой мощности водяное охлаждение дефлектора отсутствует. Вся конструкция смонтирована на фланце вакуумной камеры, что позволяет оперативно извлекать дефлектор для осмотра и ревизии.

В качестве источника высокого потенциала использована выпрямительная установка ВС-50-50. Ее основные технические параметры:

Пределы регулирования выпрямленного напряжения	0 ÷ 50 кВ
Номинальный ток нагрузки	50 мА
Точность плавной регулировки (от макс. напряжения)	1 %
Пульсация выпрямленного напряжения	± 5 %

Оптимальное напряжение дефлектора при настройке на максимальную интенсивность в плоскости облучения находится в пределах $(30 \div 35)$ кВ. При этом ток утечки составляет величину $(0,5 \div 1,5)$ мА. Для коррекции положения орбиты пучка на входе в дефлектор в противоположной от него долине установлена пара азимутальных корректирующих катушек. Каждая катушка состоит из 256 витков медного провода, намотанного на охлаждаемый водой медный каркас. Для питания катушек использован стабилизированный источник ($\Delta I/I = 10^{-5}$) с максимальным током 15 А при номинальном напряжении 15 В. Оптимизация вывода с помощью азимутальных катушек повысила интенсивность отклоненного пучка, измеренная на выходе из дефлектора (точка 1 на рис. 1), укладывается в круг диаметром ~8 мм. Эффективность прохождения пучка через дефлектор составила величину ~70%.

В ряде прикладных задач, в том числе при производстве ядерных фильтров, требуется облучение пучком тяжелых ионов широких (до нескольких десятков сантиметров) мишеней. Для этой цели обычно применяют довольно сложные и громоздкие системы сканирования пучком [3, 4]. В нашем случае было решено использовать иной способ.

Как видно из рис. 1 и 2, после дефлектора пучок проходит расстояние между точками 2 и 3 в рассеянном магнитном поле циклотрона с высокими радиальными градиентами ~50 Т/м. Проходя в таком поле, пучок испытывает сильное радиально-дефокусирующее воздействие. На рис. 4 представлено радиальное распределение интенсивности отклоненного пучка в точке 3 (см. рис. 1) для различных величин отклоняющего напряжения. В этом месте пучок уже имеет горизонтальный размер $(30 \div 50)$ мм, а в плоскости облучения (точка 4), на расстоянии 0,5 м от выводного фланца камеры циклотрона, его горизонтальный размер превышает 300 мм. При этом вертикальный размер пучка остается в пределах 10 мм.

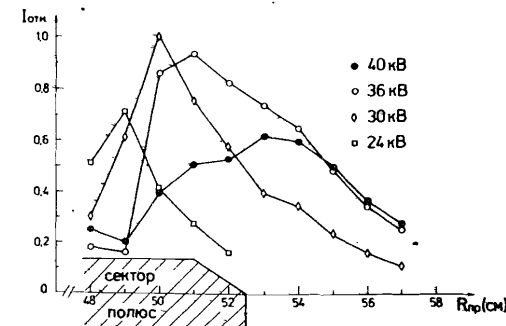


Рис. 4. Радиальное распределение интенсивности отклоненного пучка в точке 3 (см. рис. 1) для ряда отклоняющих напряжений на дефлекторе.

Проведенные измерения показали, что ионы, имеющие в точке 3 (см. рис. 1) радиальную координату $R > 53,5$ см, не попадают в выводной патрубков, что, естественно, снижает эффективность вывода. Введение в отклоненный пучок тонкой углеродной фольги привело к довороту части пучка в выводной патрубков вследствие ее обдирки и уменьшения радиуса кривизны траектории. При этом интенсивность пучка в плоскости облучения увеличилась на (15÷20)% и составила величину ~50% от интенсивности внутреннего пучка циклотрона.

На циклическом имплантаторе исследована также возможность и осуществлен вывод ионов методом обдирки на тонкой углеродной мишени. Для расчета его параметров была использована программа, написанная для исследования вывода ионов из циклотрона У-400. Методика расчета подробно описана в работе ^{15/}.

Вывод методом обдирки из циклотрона ИЦ-100 имеет особенности, налагающие ограничения на начальные условия. Таковыми являются:

- малая энергия ионов и, как следствие, малые коэффициенты обдирки (коэффициент обдирки $q = Z_2/Z_1$, где Z_1 и Z_2 — заряд иона до и после обдирки; как известно, в основном зависит от энергии иона, а также материала и толщины обдирочной мишени ^{16/}),
- малый радиус вывода,
- малая угловая протяженность долины (34°),
- малый вертикальный зазор между секторами (20 мм).

Дополнительным ограничением на начальные условия явилось то, что наклон траектории выведенного пучка к выводному фланцу вакуумной камеры желательно было получить $\sim 45^\circ$, что соответствует наклону траектории пучка ионов, выведенных с помощью электростатического дефлектора, то есть использовать тот же канал вывода.

Математическое моделирование вывода методом обдирки из ИЦ-100, с учетом указанных особенностей и ограничений, показало, что ионы с коэффициентом обдирки $q < 1,85$ вследствие относительно большого радиуса кривизны траектории в данном магнитном поле "гибнут" в центральной области циклотрона на ионном источнике.

Для $q > 1,85$ на выводной фланец попадают траектории ионов, у которых азимутальное положение обдирочной фольги $112^\circ \leq \phi_\phi \leq 119^\circ$ (угол ϕ_ϕ отсчитывается от оси резонансной системы по часовой стрелке, см. рис. 1). Вместе с тем при $\phi_\phi < 117^\circ$ траектории ободранных ионов пересекают границу сектора S_3 в двух точках, причем углы входа и выхода из сектора являются фокусирующими в радиальном и дефокусирующими в аксиальном направлении. Это приводит к значительному увеличению аксиального размера пучка в секторе и к его потере. Таким образом, возможный рабочий диапазон положений обдирочной фольги оказывается в пределах $117^\circ \leq \phi_\phi \leq 119^\circ$. Как видно из рис. 1, наклон выведенной траектории к плоскости выводного фланца для $\phi_\phi = 117^\circ$ составляет угол $\sim 45^\circ$. Это положение обдирочной фольги было выбрано в качестве рабочего.

Оценки некоторых параметров обдирочной мишени, а также параметров пучка ободранных ионов по формулам, приведенным в работе ^{17/}, дают следующие результаты. Равновесная толщина углеродной мишени

$$X \text{ мкг/см}^2 = 5,9 + 22,4 \cdot W - 1,13 \cdot W^2,$$

где W — энергия налетающего иона в МэВ/нуклон. Для ионов с энергией ~ 1 МэВ/нуклон эта толщина равна ~ 30 мкг/см². Среднеквадратичный угол рассеяния при этом составит величину $\theta_{1/2} \sim 1,2$ мрад, а энергетический разброс ионов $\delta W/W$ в пучке после обдирки увеличится на 0,08%.

Время жизни углеродной фольги под пучком самых тяжелых из диапазона ускоренных ионов $^{40}\text{Ar}^{+7}$ согласно формуле

$$T_{\text{ч}} \approx 6 \cdot 10^3 \frac{W}{Z_0^2 \cdot j},$$

где W — энергия налетающего иона в МэВ/нуклон, Z_0 — заряд ядра иона, j — плотность пучка на мишени, р.мкА/см², при энергии 1,15 МэВ/нуклон и плотности пучка на мишени ~ 1 р.мкА/см² составило величину около 20 часов, что приблизительно соответствует времени жизни ионного источника.

В таблице приведены параметры обдирки ионов из диапазона ускоренных на ИЦ-100, где A — масса иона, Z_1 — заряд иона до обдирки, Z_2 — равновесный заряд иона после обдирки, W — энергия налетающего иона, K — содержание ионов данной зарядности в пучке после обдирки.

Сечение выведенного пучка на расстоянии 0,5 м от плоскости выводного фланца (точка 4 на рис. 1) вписывается в круг диаметром 30 мм, что вполне пригодно для его использования или дальнейшей транспортировки. Эффективность вывода для каждого сорта ионов соответствует коэффициенту K , указанному в таблице.

Авторы выражают искреннюю благодарность академику Г.Н.Флеорову за постоянный интерес и внимание к работе.

Таблица

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Болтушкин В.В. и др. ОИЯИ, 9-86-305, Дубна, 1986.
2. Басаргин Ю.Г., Литуновский Р.Н. В кн.: Электрофизическая аппаратура. Атомиздат, М., 1966, вып. 5, с.135.
3. Флеров Г.Н., Кузнецов В.И. В кн.: Труды Международной школы молодых ученых по проблемам ускорителей заряженных частиц. ОИЯИ, Д9-84-817, Дубна, 1984, с.3.
4. Люк Х.Б. и др. В кн.: Совещание по использованию ядерных фильтров для решения научно-технических и народнохозяйственных задач и радиационному материаловедению. ОИЯИ, Р18-86-110, Дубна, 1986, с.37.
5. Гульбекян Г.Г., Мордуев А.М. ОИЯИ, 9-84-480, Дубна, 1984.
6. Baron E. IEEE Trans. on Nucl.Sci., 1979, vol. NS-26.
7. Erb W. GSI-P-7-78, Darmstadt, October, 1978.

Рукопись поступила в издательский отдел
8 декабря 1986 года.

НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

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

Д2-82-568	Труды совещания по исследованиям в области релятивистской ядерной физики. Дубна, 1982.	1 р. 75 к.
Д9-82-664	Труды совещания по коллективным методам ускорения. Дубна, 1982.	3 р. 30 к.
Д3,4-82-704	Труды IV Международной школы по нейтронной физике. Дубна, 1982.	5 р. 00 к.
Д11-83-511	Труды совещания по системам и методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применению в теоретической физике. Дубна, 1982.	2 р. 50 к.
Д7-83-644	Труды Международной школы-семинара по физике тяжелых ионов. Алушта, 1983.	6 р. 55 к.
Д2,13-83-689	Труды рабочего совещания по проблемам излучения и детектирования гравитационных волн. Дубна, 1983.	2 р. 00 к.
Д13-84-63	Труды XI Международного симпозиума по ядерной электронике. Братислава, Чехословакия, 1983.	4 р. 50 к.
Д2-84-366	Труды 7 Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1984.	4 р. 30 к.
Д1,2-84-599	Труды VII Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1984.	5 р. 50 к.
Д17-84-850	Труды III Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1984. /2 тома/	7 р. 75 к.
Д10,11-84-818	Труды V Международного совещания по проблемам математического моделирования, программированию и математическим методам решения физических задач. Дубна, 1983	3 р. 50 к.
	Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1984 /2 тома/	13 р. 50 к.
Д4-85-851	Труды Международной школы по структуре ядра, Алушта, 1985.	3 р. 75 к.
Д11-85-791	Труды Международного совещания по аналитическим вычислениям на ЭВМ и их применению в теоретической физике. Дубна, 1985.	4 р.
Д13-85-793	Труды XП Международного симпозиума по ядерной электронике. Дубна 1985.	4 р. 80 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

Гульбекян Г.Г. и др.
Получение выведенных пучков на циклическом имплантаторе тяжелых ионов ИЦ-100

9-86-785

В Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ завершено создание циклического имплантатора тяжелых ионов ИЦ-100. Вывод ускоренных пучков осуществлен двумя способами: с использованием электростатического дефлектора и методом обдирки на углеродной мишени. Получены выведенные пучки ионов ряда элементов от ^{12}C от ^{40}Ar с энергией 1+1,2 МэВ/нуклон. Эффективность электростатического вывода составляет величину 50%. Дано описание конструкции электростатического дефлектора. Приведены основные параметры электростатического вывода и вывода методом обдирки.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1986

Перевод О.С.Виноградовой

Gulbekian G.G. et al.
Production of Extracted Beams on IC-100 Cyclic Implantator

9-86-785

The creation of heavy ion cyclic implantator has been completed at the Laboratory of Nuclear Reactions, JINR. The extraction of accelerated beams was realized by two methods: with the use of the electrostatic deflector and by stripping of carbon target. The extracted ion beams of elements from ^{12}C to ^{40}Ar with 1-1.2 MeV/nucleon energy have been received. The efficiency of the electrostatic extraction is about 50%. The construction of electrostatic deflector is described. The main parameters of electrostatic and stripping extraction are presented.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1986