

УСКОРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ИЦ-100 ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ НАУЧНО-ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

*Б. Н. Гикал, С. Н. Дмитриев, Г. Г. Гульбекян, П. Ю. Апель,
В. В. Башевой, С. Л. Богомолов, О. Н. Борисов, В. А. Бузмаков,
И. А. Иваненко, О. М. Иванов, Н. Ю. Казаринов, И. В. Колесов,
В. И. Миронов, А. И. Папаш, С. В. Пащенко, В. А. Скуратов,
А. В. Тихомиров, М. В. Хабаров, А. П. Череватенко, Н. Ю. Язвицкий*
Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

На циклотронном комплексе ИЦ-100 Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ реализовано промышленное изготовление ядерных фильтров. В результате проведения полной модернизации циклотрон был оснащен сверхпроводящим ЭЦР-источником и системой внешней аксиальной инжекции пучка. Имплантационный комплекс был оборудован специализированным каналом транспортировки с системой сканирования пучка и установкой для облучения полимерных пленок. Получены интенсивные пучки тяжелых ионов Ne, Ar, Fe, Kr, Xe, I, W с энергией ~ 1 МэВ/нуклон. Проведены научные исследования свойств облученных кристаллов, облучение различных полимерных пленок, изготовлено несколько тысяч квадратных метров трековых мембран в широком диапазоне изменения плотности отверстий. На циклотронном комплексе можно решать и другие научно-прикладные задачи.

The complex based on the cyclotron IC-100 of the JINR Laboratory of Nuclear Reactions (Dubna, Russia) provides industrial fabrication of nuclear filters. After the modernization the cyclotron was equipped with superconducting ECR-ion source as well as with axial injection system. The specialized beam channel with two coordinates scanning system and equipment for irradiation of polymer films has been installed in the implantation part of the complex. High intensity heavy ion beams of Ne, Ar, Fe, Kr, Xe, I, W have been accelerated to 1 MeV/nucleon energy. The investigation of irradiated crystals features, irradiation of different polymer films have been provided. Also a few thousands of square meters of track films with holes in the wide range of densities have been produced. The cyclotron-based complex is capable of solving different kinds of scientific and applied problems as well.

PACS: 07.07.-a

ВВЕДЕНИЕ

В 1985 г. в ЛЯР ОИЯИ был разработан циклический имплантатор тяжелых ионов ИЦ-100 [1, 2]. Циклотрон предназначался для ускорения ионов от углерода $^{12}\text{C}^{2+}$ до аргона $^{40}\text{Ar}^{7+}$ с фиксированной энергией $\sim 1,2$ МэВ/нукл. при ускорении на 4-й гармонике высокочастотной системы и $\sim 0,6$ МэВ/нукл. при ускорении на 6-й гармонике ВЧ. На ускорителе использовался внутренний источник ионов типа PIG, который полностью определял массовый диапазон ускоряемых ионов [5]. С целью более эффективного использования комплекса, а также для реализации промышленного изготовления ядерных фильтров, было предложено перейти на облучение пленок более тяжелыми ионами [3].

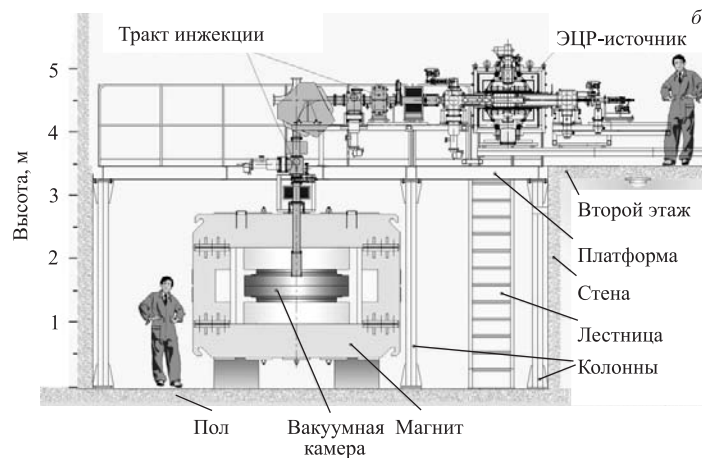
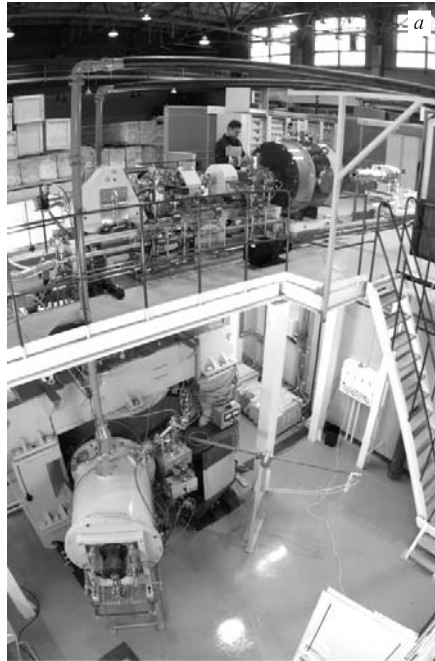


Рис. 1. *а)* Общий вид циклотрона ИЦ-100. Вверху — линия инъекции, сверхпроводящий ЭЦР-источник. Внизу — магнит циклотрона, резонансный бак № 1. *б)* Схема расположения циклотрона ИЦ-100 и системы аксиальной инъекции [1]

В результате проведенной в течение 2003–2005 гг. модернизации имплантационный комплекс ИЦ-100 был оснащен системой внешней аксиальной инъекции пучка в циклотрон (рис. 1, *а*) и сверхпроводящим ионным источником на основе электронного циклотронного резонанса (ЭЦР) (рис. 1, *б*), позволившим получить интенсивные пучки высо-

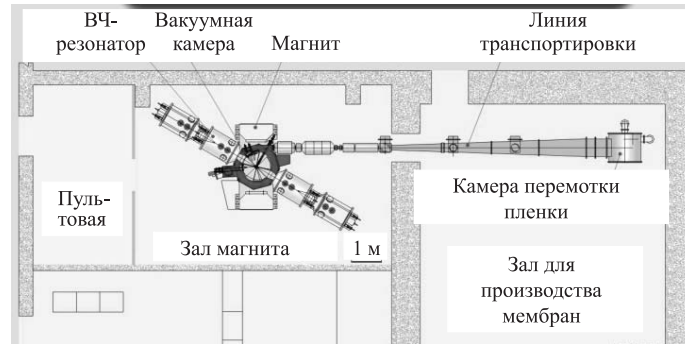


Рис. 2. Расположение оборудования для производства ядерных фильтров

козарядных ионов ксенона, йода, криптона, аргона, других тяжелых элементов Периодической системы Д. И. Менделеева [4]. Запуск и отладка систем циклотрона ИЦ-100 проводился на пучках ионов $^{86}\text{Kr}^{15+}$ и $^{132}\text{Xe}^{23+}$. Интенсивность ускоренных и выведенных пучков составляет ~ 2 мкА.

Были также ускорены пучки ионов аргона $^{40}\text{Ar}^{7+}$ с током более 2 мкА, железа $^{56}\text{Fe}^{10}$ с интенсивностью 0,3 мкА, йода $^{127}\text{I}^{22+}$ с током до 0,25 мкА, ксенона $^{132}\text{Xe}^{24+} \sim 0,6$ мкА, вольфрама $^{182}\text{W}^{32+} \sim 0,015$ мкА и т. д. (см. табл. 3).

В ходе пусконаладочных работ проведено изменение схемы канала инжекции пучка от ЭЦР-источника до входа в центральную область циклотрона. В дополнение к двум фокусирующим соленоидам установлен третий, короткофокусный соленоид на расстоянии около 60 см от медианной плоскости циклотрона, позволивший существенно увеличить акцептанс вертикальной части канала инжекции.

В центре циклотрона установлен спиральный инфлектор. Положение и форма электродов в центральной области оптимизированы с целью обеспечения оптимального ускорения ионов на первых оборотах.

Для вывода ионов из ИЦ-100 используется электростатический дефлектор и два фокусирующих магнитных канала.

Дополнительное шиммирование полюсов циклотрона компенсировало искажения магнитного поля, вызванные установкой пассивных фокусирующих магнитных каналов, что позволило сцентрировать пучок и уменьшить провал среднего магнитного поля.

Создан специализированный канал транспортировки пучка с установкой для облучения полимерной пленки, а также бокс для проведения исследований на пучках тяжелых ионов. В линии транспортировки выведенного пучка установлена система сканирования пучка в двух плоскостях [7], обеспечивающая однородную имплантацию ионов на большой площади мишени (рис. 2). Установка двух ВЧ-генераторов с отдельной подачей мощности на каждый резонатор позволила кардинально улучшить настройку циклотрона и обеспечить долговременную стабильность тока пучка.

Были выполнены экспериментальные измерения свойств пучка и определены факторы, влияющие на качество и интенсивность выведенных ионов. Проведенные тесты и анализ параметров пучка позволили диагностировать и решить проблемы, связанные с однородностью облучения пленки и долговременной стабильностью пучка, и добиться параметров установки, близких к проектным значениям. Сравнение проектных и полученных значений параметров представлено в табл. 1.

Таблица 1. Сравнение проектных и реализованных параметров ИЦ-100

Параметр	Проектные значения	Реализовано в эксплуатации
Ускоряемые ионы	Ar, Kr, Xe	$^{22}\text{Ne}^{4+}$, $^{40}\text{Ar}^{7+}$, $^{56}\text{Fe}^{10+}$, $^{86}\text{Kr}^{15+}$, $^{127}\text{I}^{22+}$, $^{132}\text{Xe}^{23+}$, $^{132}\text{Xe}^{24+}$, $^{182}\text{W}^{32+}$, $^{184}\text{W}^{31+}$, $^{184}\text{W}^{32+}$
Диапазон ускоряемых ионов	$A/Z = 5,3-6,0$	$A/Z = 5,5-5,95$
Гармоника ускорения	4	4
Энергия ионов, МэВ/нукл.	1–1,25	0,9–1,1
Среднее магнитное поле, Тл	1,88–2,01	1,78–1,93
Частота ВЧ-генератора, МГц	20,4–20,9	19,8–20,6
Энергия инжекции, кВ	12,5	14–15
Вакуум в линии инжекции, Торр	$5 \cdot 10^{-7}$	$1,5 \cdot 10^{-7}$
Рабочий вакуум в циклотроне, Торр	$5 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-8}$
Напряжение на дуанте, кВ	50	45–55
Эффективность транспортировки пучка по каналу инжекции после сепарации	0,8	0,5–0,8
Эмиттанс пучка из ЭЦР-источника после сепарации и коллимации в анализирующем магните, мм · мрад	250π (4 RMS)	$\sim 250\pi$ (оценка) (4 RMS)
Акцептанс канала инжекции, мм · мрад	225π	$\sim 220\pi$ (оценка)
Интенсивность ускоренного и выведенного пучка $^{86}\text{Kr}^{15+}$, с^{-1}	$\sim 10^{12}$ (2,5 мкА)	$8 \cdot 10^{11}$ (2 мкА)
Интенсивность ускоренного и выведенного пучка $^{132}\text{Xe}^{23+}$, с^{-1}	$\sim 2,6 \cdot 10^{11}$ (1 мкА)	$3 \cdot 10^{11}$ (1,2 мкА)
Однородность плотности пор в трековых мембранах, %	± 10	± 10
Долговременная стабильность тока выведенного пучка, %	± 10	$\pm 10-15$
Однородность плотности отверстий при многократном прохождении пленки, %	—	$< \pm 5$

1. ЭЦР-ИСТОЧНИК

Циклотрон ИЦ-100 проектировался для ускорения многозарядных ионов в диапазоне $A/Z = 5,3-6,0$, что накладывало жесткие критерии на получение интенсивных пучков высокозарядных ионов тяжелых элементов. Для этого в ЛЯР ОИЯИ совместно с сотрудниками Лаборатории высоких энергий был разработан сверхпроводящий ЭЦР-источник

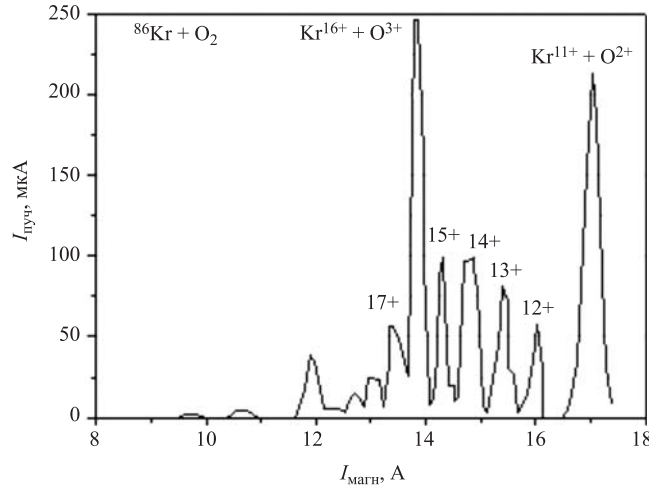


Рис. 3. Спектральный состав ионов криптона, полученных из ЭЦР-источника DECRIS-SC. Напряжение экстракции 12,5 кВ. СВЧ-мощность 380 Вт

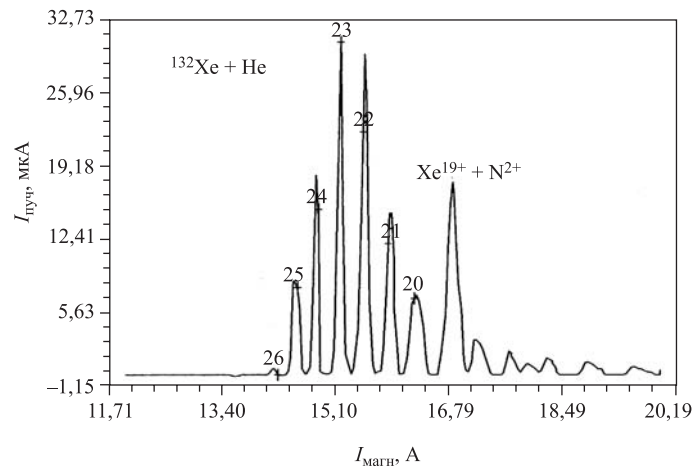


Рис. 4. Спектральный состав ионов ксенона, полученных из ЭЦР-источника DECRIS-SC. Мощность СВЧ 390 Вт

ионов с уровнем аксиального поля до 3 Тл и частотой СВЧ-нагрева 18 ГГц [3, 4]. Сверхпроводящий источник ионов DECRIS-SC показал себя исключительно эффективным и надежным в эксплуатации. Спектры ионов криптона и ксенона приведены на рис. 3 и 4. Ток пучка ионов криптона и ксенона измерялся в фокальной плоскости анализирующего магнита (рис. 5). После сепарации и коллимации инжектируемого пучка на диафрагме диаметром 20 мм ток пучка ионов $^{86}\text{Kr}^{15+}$ при оптимизации настройки ускорителя на мишень составлял 60–70 мкА, ток пучка ионов $^{132}\text{Xe}^{23+}$ равен 25 мкА (см. табл. 2). Это близко к проектным значениям интенсивности указанных ионов из ЭЦР-источника (см. табл. 1). Ионный источник обладает значительным запасом по интенсивности инжектируемых пучков тяжелых ионов и позволяет в широких пределах регулировать ток

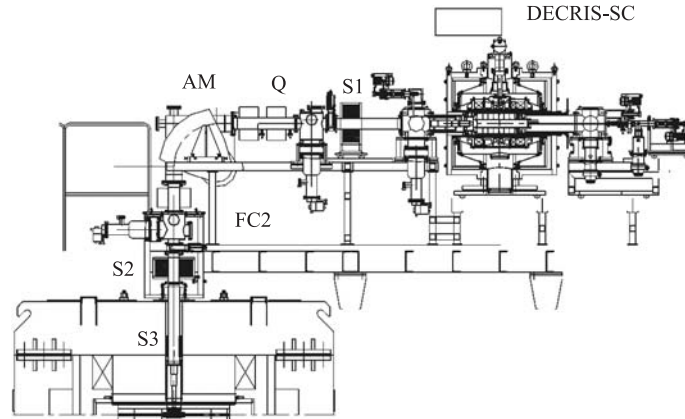


Рис. 5. Канал аксиальной инжекции. Общая длина канала 5222 мм. DECRI-S-SC — сверхпроводящий ЭЦР-источник; AM — анализирующий магнит; S1, S2, S3 — фокусирующие соленоиды; Q — корректирующая квадрупольная линза; FC2 — цилиндр Фарадея. Банчер расположен внутри блока диагностики FC2

пучка на мишени. Управление ЭЦР-источником осуществляется с панели управления циклотрона ИЦ-100 (см. рис. 28).

2. КАНАЛ АКСИАЛЬНОЙ ИНЖЕКЦИИ

Схема канала аксиальной инжекции циклотрона ИЦ-100 приведена на рис. 5. Основными ионно-оптическими элементами канала являются фокусирующие соленоиды, корректирующая квадрупольная линза, анализирующий магнит и корректирующие дипольные магниты. В ходе настройки ускорителя было проведено экспериментальное исследование условий прохождения пучка по каналу инжекции ИЦ-100 в зависимости от различных факторов и сравнение с результатами компьютерных расчетов (рис. 6). Моделирование проводилось с помощью библиотеки программ расчета динамики многокомпонентных интенсивных пучков ионов [8]. Инфлектор представлялся как коллиматор с диаметром отверстия 8 мм.

Результаты компьютерного моделирования представлены в виде траекторий частиц (рис. 6, а) и огибающих пучка вдоль линии инжекции от выхода из ЭЦР-источника до входа в инфлектор (рис. 6, б, в). Анализировались две схемы транспортировки с двумя фокусирующими соленоидными и с тремя соленоидными. Третий фокусирующий элемент был установлен для согласования пучка на входе в инфлектор. Распределение интенсивности ионов в канале инжекции представлено на рис. 6, г. Среднеквадратичный эмиттанс (4 RMS) пучка ионов $^{86}\text{Kr}^{15+}$ после сепарации в анализирующем магните составляет $\varepsilon \sim 250\pi$ мм·мрад ($\varepsilon^{\text{норм}} \sim 0,8\pi$ мм·мрад) [3], что несколько превышает пропускную способность вертикальной части линии внешней инжекции ИЦ-100. Аксептанс канала в режиме работы с двумя соленоидными составляет $A \sim 150\pi$ мм·мрад ($A^{\text{норм}} \sim 0,5\pi$ мм·мрад) при входной диафрагме в инфлектор 8 мм и $A \sim 190\pi$ мм·мрад ($A^{\text{норм}} \sim 0,65\pi$ мм·мрад) при диафрагме 10 мм.

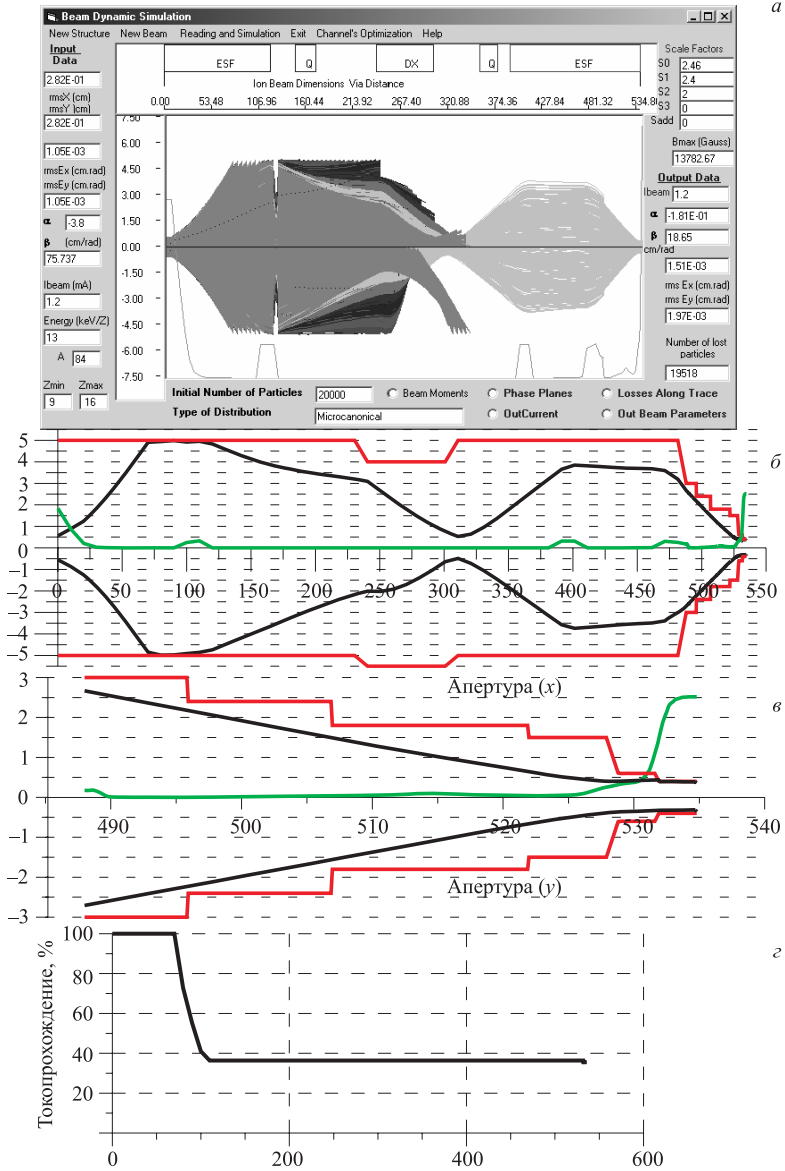


Рис. 6. Линия инжекции ИЦ-100 с тремя соленоидами. Траектории частиц, обходящие пучка в канале инжекции и магнитной пробке, а также распределение тока пучка с учетом потерь вдоль канала. x, y — координаты

Из расчетов следует, что в зависимости от настройки элементов канала до 40 % от тока пучка из ЭЦР-источника теряется в горизонтальной части линии инжекции, что в принципе допустимо с точки зрения согласования пучка из источника с акцептансом циклотрона. Потери в этой части линии инжекции ИЦ-100 могут быть частично скомпенсированы за счет сокращения общей длины горизонтальной части канала и приближения

соленоида S1 к ЭЦР-источнику, а также с помощью фокусирующей линзы Эйнзеля, установленной на выходе из ЭЦР-источника.

В процессе запуска ускорителя наблюдались потери интенсивности пучка при прохождении вертикальной части канала инъекции. При визуальном осмотре входного окна корпуса инфлектора был идентифицирован ореол пучка диаметром 12 мм, равный размеру отверстия в магнитной пробке ИЦ-100 на расстоянии ~ 5 см от медианной плоскости. Из конструкторских соображений и ограниченных габаритов в центре магнита ИЦ-100 был изготовлен инфлектор с размером входного окна 8×16 мм.

С целью повышения эффективности транспортировки пучка были выполнены дополнительные расчеты и проведен анализ прохождения канала. В режиме работы с двумя соленоидами не удается сфокусировать пучок в пятно диаметром 8 мм на входе в инфлектор. При прохождении вертикальной части канала до 40 % тока пучка может быть потеряно на входе в магнитную пробку циклотрона и инфлектор. Для согласования пучка и уменьшения потерь в вертикальной секции канала инъекции ИЦ-100 было принято решение установить дополнительный ионно-оптический элемент — короткофокусный соленоид S3. Было проведено сравнение эффективности транспортировки пучка для геометрии с двумя соленоидами и варианта с тремя соленоидами (рис. 6). В последнем случае пучок проходит наиболее узкую часть канала инъекции практически без потерь. Соленоид S3, расположенный внутри ярма магнита на расстоянии 575 мм от медианной плоскости, позволяет увеличить аксептанс канала с $A \sim 150\pi$ мм·мрад до $A \sim 250\pi$ мм·мрад, а также сфокусировать пучок в пятно диаметром 8 мм на входе в инфлектор.

3. ИНФЛЕКТОР

Инжектируемый пучок ионов из аксиального канала поворачивается в медианную плоскость циклотрона с помощью спирального инфлектора. Входное окно инфлектора

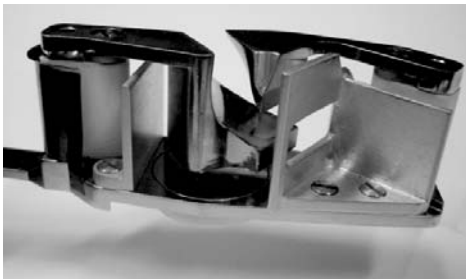


Рис. 7. Новый спиральный инфлектор. Показаны верхний и нижний электроды и механизм крепления. Зазор между электродами инфлектора 8 мм. Справа видно выходное окно размером 16×38 мм

имеет прямоугольную форму с апертурой 8×16 мм (рис. 7). Электрический радиус инфлектора составляет 15 мм, что примерно равно высоте от входа в инфлектор до медианной плоскости, а магнитный радиус инфлектора равен 18 мм. Параметры инфлектора определялись доступным свободным местом в центре магнита ИЦ-100 и возможностью размещения деталей корпуса инфлектора. Напряжение инъекции из ЭЦР-источника DECRIS-SC составило 12,5 кВ и было выбрано исходя из расчетов, а также технических возможностей существующей установки [6].

В процессе экспериментальной оптимизации системы аксиальной инъекции и ЭЦР-источника напряжение инъекции было повышено до 14 кВ. На фотографии нижнего электрода инфлектора виден след от пучка шириной около 8 мм (рис. 8). Пучок полностью занимает пространство между электродами. Корпус и электроды инфлектора, а также

элементы центральной оптики представлены на рис. 9. Для измерения интенсивности и профиля пучка после прохождения инфлектора в медианной плоскости циклотрона перед первым ускоряющим зазором был установлен съемный пробник размером 20×15 мм. На пробнике был зафиксирован след от пучка, имеющий форму узкой полосы шириной менее 3 мм, вытянутой с небольшим наклоном в вертикальном направлении на 12 мм. Полоса была окружена овальным ореолом шириной около 8 мм. Коэффициент трансмиссии пучка от входа в инфлектор до первого ускоряющего зазора варьируется в зависимости от настройки канала инжекции и составляет 40–60 % (см. табл. 2).



Рис. 8. Нижний электрод спирального инфлектора ИЦ-100

Потери пучка в инфлекторе и пролетном промежутке между инфлектором и первым ускорительным зазором вызваны несколькими факторами: малая апертура инфлектора, большая угловая расходимость пучка в вертикальном направлении на выходе из инфлектора (что было зафиксировано по следу от пучка), малый вертикальный зазор между секторами циклотрона ~ 20 мм и отсутствие аксиальной фокусировки до попадания в первый ускоряющий зазор. Вытягивание пучка в вертикальном направлении вызвано краевыми электрическими полями, а также неоднородностью электрического поля между электродами инфлектора. Были проведены работы по максимально возможному согласованию всех перечисленных факторов.

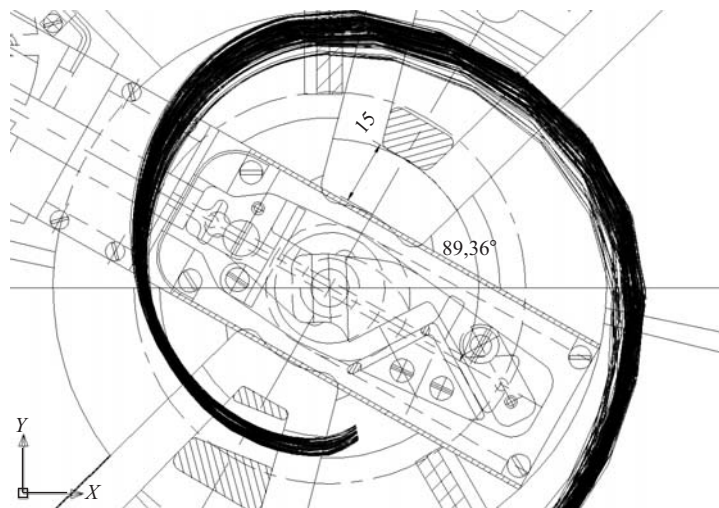


Рис. 9. Модифицированная центральная область циклотрона ИЦ-100. Показаны механизм подачи, корпус и электроды инфлектора, а также дуанты и центральные траектории ионов

Техническим недостатком конструкции инфлектора являлось быстрое (в течение недели) заплытие изоляторов. В модифицированной конструкции спирального инфлектора (см. рис. 7) изоляторы экранированы от прямого попадания пучка и распыленного материала.

4. СИСТЕМА ГРУППИРОВАНИЯ ПУЧКА

Фазовый акцептанс циклотрона ИЦ-100 составляет 30–40° периода ВЧ, что соответствует 10 %-му захвату в режим ускорения несгруппированного пучка. Система группирования с использованием синусоидального банчера на первой гармонике высокочастотной ускоряющей системы позволяет увеличить плотность частиц в диапазоне фаз, ускоряемых в циклотроне, и тем самым увеличить эффективность захвата примерно в три раза. Из конструктивных соображений банчер размещен в блоке диагностики канала аксиальной инжекции пучка на расстоянии 1800 мм от медианной плоскости. В настоящее время на циклотроне ИЦ-100 установлен однозазорный банчер, состоящий из двух сеток, на которые подается противофазное синусоидальное напряжение.

Была выполнена серия расчетов по определению эффективности группирования ионов $^{86}\text{Kr}^{15+}$ в линии инжекции ИЦ-100 в зависимости от различных факторов, в том числе от геометрических параметров банчера и напряжения между электродами. Варьировался зазор между сетками и расстояние между проволочками.

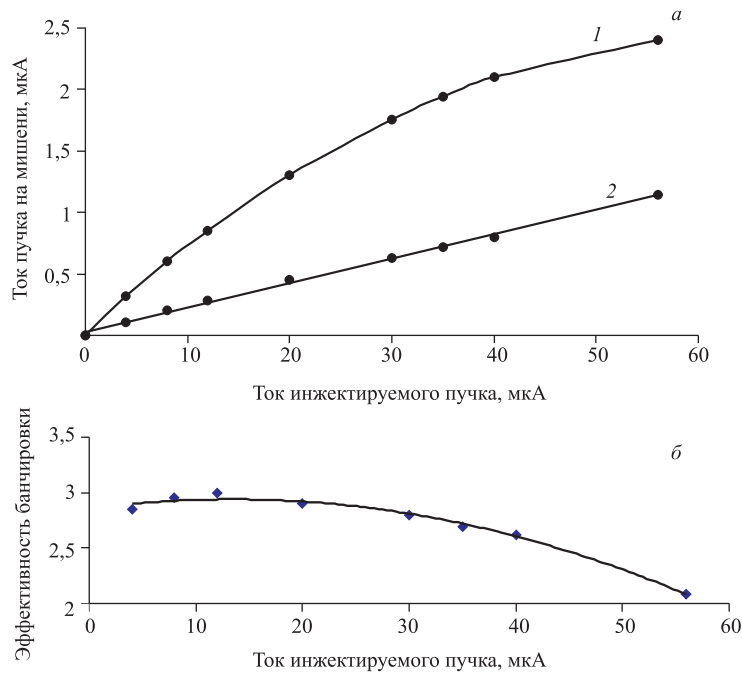


Рис. 10. а) Ток ускоренного пучка ионов $^{86}\text{Kr}^{15+}$ в зависимости от интенсивности инжектируемого пучка: 1 — банчер включен, 2 — банчер выключен; б) эффективность группирования ионов $^{86}\text{Kr}^{15+}$ в зависимости от тока инжектируемого пучка. Коэффициент банчировки определялся по отношению тока выведенного пучка с включенным банчером к току пучка без банчера

Конструкция банчера была оптимизирована для достижения необходимой однородности электрического поля между электродами, расстояние между проволочками было выбрано 4 мм, зазор между электродами 3 мм. В этой конструкции пролетное время ионов $^{86}\text{Kr}^{15+}$ с энергией 2,5 кэВ/А составляет не более 25° периода ВЧ при частоте ВЧ-резонатора 20,2 МГц. В процессе испытаний система группирования позволила существенно увеличить интенсивность ускоренного пучка по сравнению с током без банчера. Коэффициент группирования зависит от тока инжектируемого пучка. В рабочем режиме при максимальной интенсивности инжектируемого пучка ~ 70 мкА в процесс ускорения захватывается до 27 % от тока инжектируемого пучка, что в 2,7 раза больше, чем в случае инъекции несгруппированного пучка.

Были проведены измерения зависимости интенсивности ускоренного пучка ионов $^{86}\text{Kr}^{15+}$ при включенном банчере от тока инъекции (рис. 10, а). Ток инжектируемого пучка измерялся с пластины положительного электрода инфлектора. Ток выведенного пучка измерялся в цилиндре Фарадея, расположенном в канале транспортировки. Следует ожидать, что в циклотроне ИЦ-100 происходит насыщение тока выведенного пучка ионов $^{86}\text{Kr}^{15+}$ при интенсивности инжектируемого пучка более 80 мкА. Эффективность группирования ионов $^{86}\text{Kr}^{15+}$ в зависимости от тока инжектируемого пучка приведена на рис. 10, б. Коэффициент группирования определялся по отношению тока выведенного пучка с включенным банчером к току выведенного пучка при выключенном банчере. Эффективность группирования уменьшается с ростом тока инжектируемого пучка, что может быть вызвано влиянием пространственного заряда в продольном направлении.

5. УСКОРЕНИЕ В ЦИКЛОТРОНЕ

Циклотрон ИЦ-100 работает при высоких уровнях магнитного поля $\sim 1,9$ Тл. Зависимость среднего магнитного поля от тока основной обмотки магнита в рабочем диапазоне показана на рис. 11. На рис. 12 представлена внутренняя часть циклотрона со стороны долины, где размещается дефлектор. Вертикальный зазор между секторами составляет 20 мм. В глубине видны центральная пробка магнита и корпус инфлектора.

В ходе запуска и наладки циклотрона ИЦ-100 были выполнены расчетно-экспериментальные исследования по оптимизации положения и размеров центральных элементов циклотрона, элементов конструкции на первых оборотах в центре циклотрона. Зазоры между дуантами и формирующими рамками, находящимися под потенциалом земли, были уменьшены на первом обороте пучка до 7 мм. При этом обеспечивается наилучшее фазовое движение частиц и фокусировка пучка (см. рис. 9). На последующих оборотах горизонтальный зазор между дуантами и плакировками составляет 10 мм. В результате эффективность захвата пучка в режим ускорения оказалась близкой к расчетной. При выключенном банчере $\sim 10\%$ от тока инжектируемого пучка захватывается в режим ускорения, что соответствует фазовому акцептансу циклотрона $\sim 40^\circ$.

В процессе настройки ускорителя проводились измерения различных параметров пучка. В частности, была определена зависимость тока ускоренного пучка от амплитуды ускоряющего напряжения на дуантах — «пусковая характеристика» (рис. 13). Интенсивность ионов $^{132}\text{Xe}^{23+}$ измерялась на радиусе вывода. Насыщение тока пучка наступает при амплитуде ВЧ около 50 кВ, что совпадает с расчетным значением напряжения на дуантах.

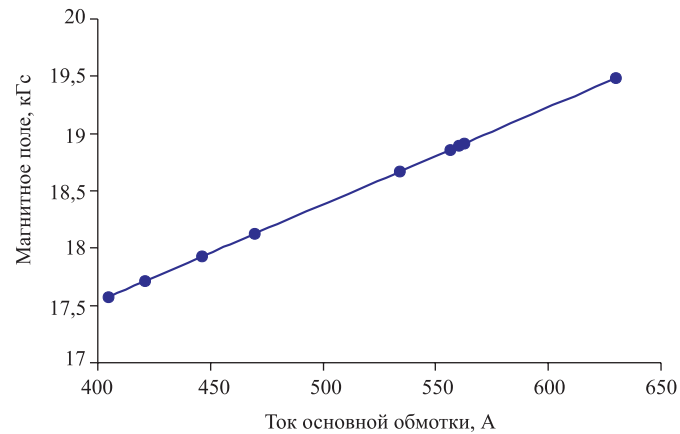


Рис. 11. Зависимость среднего магнитного поля от тока основной обмотки циклотрона ИЦ-100 в рабочей области

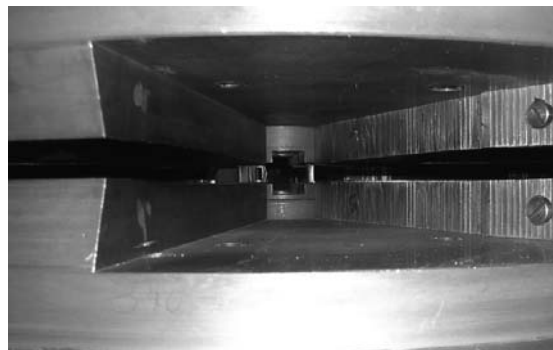


Рис. 12. Рабочий зазор магнита ИЦ-100 со стороны долины. Вертикальный зазор в долине 110 мм, между секторами 20 мм

Циклотрон ИЦ-100 используется в основном для облучения ядерных мембран тяжелыми ионами типа Ar, Kr, Xe. Диапазон ускоряемых ионов на циклотроне ИЦ-100 находится в пределах $A/Z = 5,5-5,8$, а частота ВЧ-генератора может варьироваться в небольших пределах 19,8–20,6 МГц (см. табл. 1). Энергия ускоренного пучка фиксирована и составляет 1 МэВ/нукл. Изохронное поле в циклотроне ИЦ-100 сформировано путем подбора формы секторов и дополнительных накладок на края сектора, без использования корректирующих обмоток (см. рис. 12).

Для проверки качества формирования магнитного поля были сняты резонансные кривые — зависимости тока ускоренного пучка от уровня магнитного поля на разных радиусах (рис. 14). Симметричное положение резонансных кривых на различных радиусах свидетельствует о хорошем качестве формирования поля.

Неоднократно измерялось распределение интенсивности различных ионов по радиусу. Наиболее характерные кривые для ионов $^{40}\text{Ar}^{7+}$, $^{86}\text{Kr}^{15+}$ и $^{132}\text{Xe}^{23+}$ приведены на рис. 15. В центральной области циклотрона между первым ускоряющим зазором и

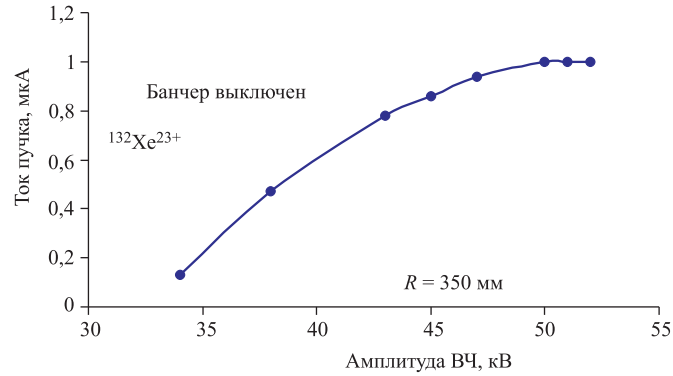


Рис. 13. Пусковая характеристика ИЦ-100. Ток выведенного пучка ионов ксенона $^{132}\text{Xe}^{23+}$ в зависимости от амплитуды ускоряющего напряжения

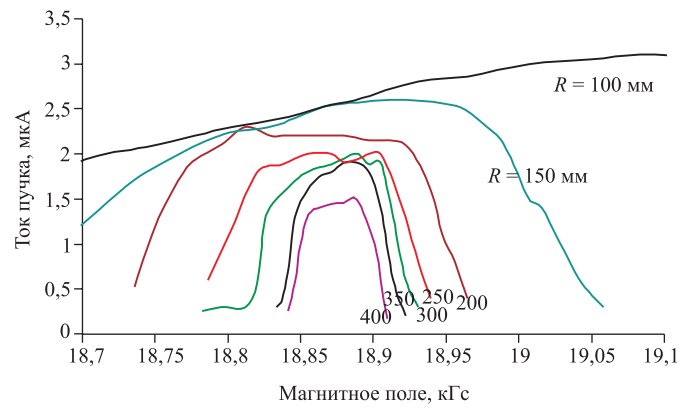


Рис. 14. Резонансные кривые циклотрона ИЦ-100. Ускорение ионов $^{86}\text{Kr}^{15+}$. Положение «плато» симметрично на различных радиусах вплоть до вывода, что свидетельствует о качестве формирования магнитного поля в ИЦ-100

вплоть до радиуса ~ 150 мм происходит фазовая сепарация пучка. Экспериментально полученный фазовый захват пучка в режим ускорения составляет $\sim 10\%$, что соответствует фазовому акцептансу циклотрона $\sim 40^\circ$. При включении банчера, установленного в канале аксиальной инжекции, эффективность захвата пучка увеличивается почти в три раза.

В основной зоне ускорения, вплоть до входа пучка в дефлектор, наблюдается падение интенсивности пучка, вызванное вертикальными апертурными потерями (зазор для пучка 20 мм). Эффективность прохождения основной области ускорения в циклотроне ИЦ-100 составляет $\sim 60-70\%$. Характер наклона кривых распределения интенсивности от радиуса практически одинаков для ионов различной зарядности $^{40}\text{Ar}^{7+}$, $^{86}\text{Kr}^{15+}$ и $^{132}\text{Xe}^{23+}$, что свидетельствует об отсутствии заметных вакуумных потерь ионов из-за перезарядки на остаточном газе.

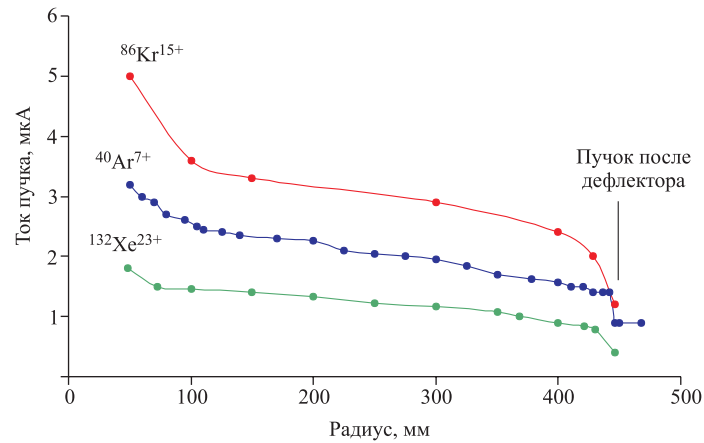


Рис. 15. Распределение тока пучка по радиусу при ускорении различных ионов в циклотроне ИЦ-100. Спад интенсивности в центре циклотрона определяется фазовой селекцией на первых оборотах

На циклотроне ИЦ-100 был ускорен и выведен в канал транспортировки пучок ионов вольфрама $^{184}\text{W}^{32+}$. После сепарации в линии инжекции интенсивность пучка ионов вольфрама составила ~ 200 нА. Ток ускоренного пучка на удаленной мишени достигал 17 нА, что соответствовало потоку частиц $3 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$. Для получения ионов металла использовался композитный порошок гексакарбонил вольфрама $\text{W}(\text{CO})_6$ [11]. Оптимальная мощность СВЧ-нагрева плазмы в ионном источнике составляла 300–400 Вт.

Для получения ионов железа в разрядную камеру ЭЦР-источника подавались пары металлоцена $\text{Fe}(\text{C}_5\text{H}_5)_2$. Выход ионов железа после сепарации в линии инжекции составляет $\sim 3\text{--}5$ мкА для зарядов 9+, 10+, 11+. Ускоренный и выведенный в канал транспортировки ток ионов $^{56}\text{Fe}^{10+}$ был на уровне 0,5 мкА (поток ионов $3 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$).

6. ВАКУУМНЫЕ ПОТЕРИ

Выполнена серия экспериментов по исследованию влияния вакуума в камере циклотрона на потери пучка тяжелых ионов в процессе ускорения. Измерялся коэффициент трансмиссии пучка в процессе ускорения различных ионов как отношение тока пучка в центре циклотрона к току пучка на радиусе вывода при различных значениях вакуума внутри циклотрона. При изменении давления в вакуумной камере циклотрона ИЦ-100 почти в 30 раз (с уровня $5 \cdot 10^{-8}$ до $1,5 \cdot 10^{-6}$ Торр) коэффициент трансмиссии при ускорении ионов $^{40}\text{Ar}^{7+}$ уменьшается примерно на 20% (рис. 16), что вполне согласуется с результатами расчетов вакуумных потерь в камере циклотрона [9, 10]. Аналогичные измерения были выполнены для ионов $^{86}\text{Kr}^{15+}$ и $^{132}\text{Xe}^{23+}$.

Экспериментально измеренные зависимости интенсивности ускоренного пучка различных ионов на выводном радиусе от давления в вакуумной камере циклотрона в сравнении с расчетом приведены на рис. 17.

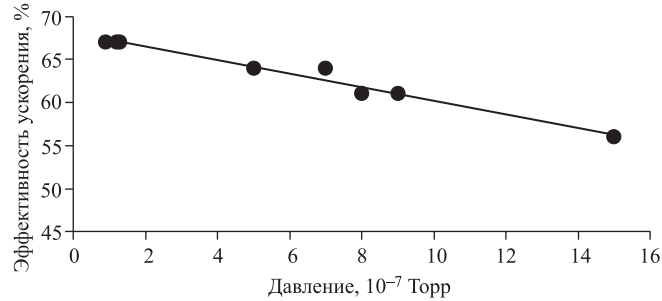


Рис. 16. Эффективность ускорения ионов Ag^{7+} внутри циклотрона в зависимости от вакуума. Коэффициент прохождения определялся по отношению тока пучка в области вывода ($R = 420$ мм) к току пучка в центре циклотрона ($R = 150$ мм)

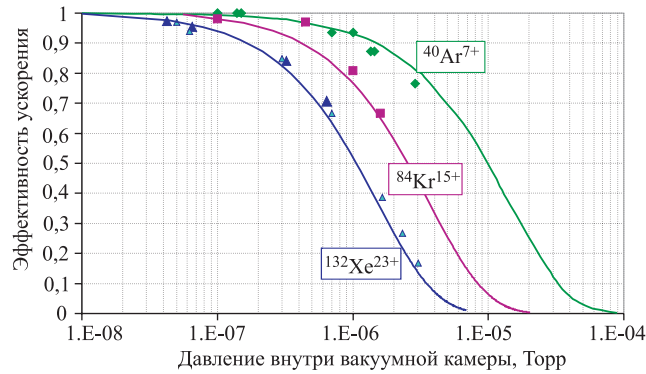


Рис. 17. Потери ионов при ускорении в циклотроне ИЦ-100 в зависимости от давления в вакуумной камере. По оси x показано давление в камере циклотрона, по оси y — эффективность прохождения. Кривые — результаты расчетов; символы — данные измерений

При длительной работе с пучком рабочее давление внутри вакуумной камеры циклотрона ИЦ-100 составляет $\sim 5 \cdot 10^{-8}$ Торр, и каких-либо существенных потерь многозарядных ионов на остаточном газе не наблюдается.

7. ВЫВОД ПУЧКА

Система вывода ИЦ-100 состоит из электростатического дефлектора и двух пассивных фокусирующих магнитных каналов (см. рис. 18). На рисунке также отмечена выводная траектория пучка, проходящая в рассеянном поле циклотрона около 150° . Фото электростатического дефлектора представлено на рис. 19. Слева на фото виден защитный кожух. Потенциальная пластина дефлектора покрыта нитридом титана и имеет канавку со стороны пучка глубиной 1 мм и высотой 20 мм для перехвата вторичных электронов, выбитых пучком с поверхности электрода. Рабочее напряжение на дефлекторе соста-

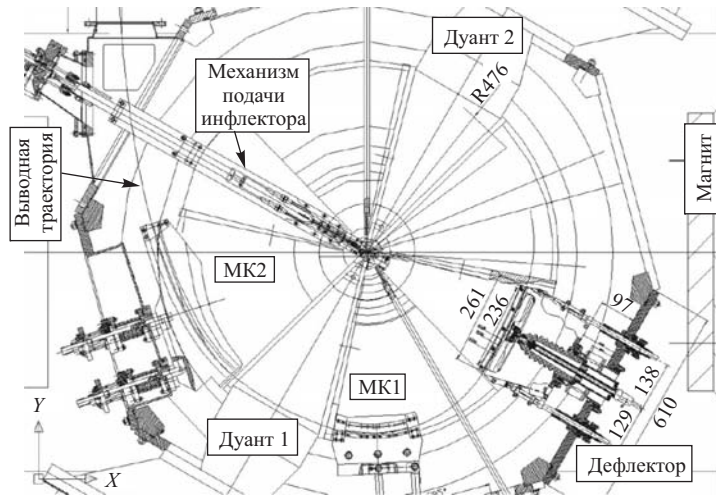


Рис. 18. Система вывода пучка из циклотрона ИЦ-100. Показаны элементы вывода — электростатический дефлектор, два пассивных магнитных канала МК1 и МК2 и траектория пучка на выводе, а также механизм подачи инфлектора, внутренние пробники пучка и дуанты

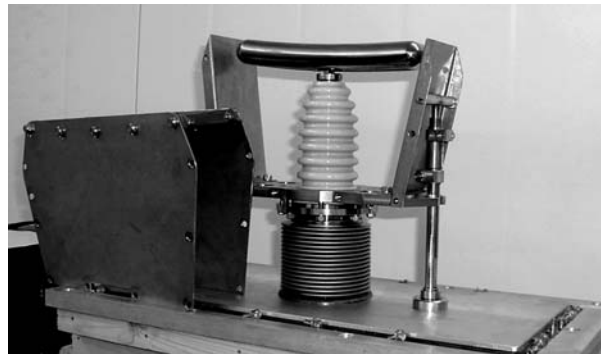


Рис. 19. Электростатический дефлектор. Слева — защитный кожух. Потенциальная пластина анодирована и имеет канавку со стороны пучка глубиной 1 мм и высотой 20 мм для захвата вторичных электронов, выбитых пучком с поверхности потенциального электрода

вляет 50 кВ при зазоре между потенциальным и заземленным электродами в 10 мм, но при необходимости может быть увеличено до 55 кВ.

Оба градиентных канала расположены в секторных зазорах (рис. 18). Магнитный канал МК1 имеет азимутальную протяженность 20° и рабочую апертуру 15×15 мм (рис. 20). Магнитный канал МК2 имеет азимутальную протяженность 50° и рабочую апертуру 20×10 мм (рис. 21). Для формирования необходимого фокусирующего градиента магнитного поля в рабочей апертуре магнитных каналов были выполнены расчеты формы железных масс и проведены магнитные измерения. В результате оптимизации было сфор-



Рис. 20. Магнитный канал №1. Виден след от пучка

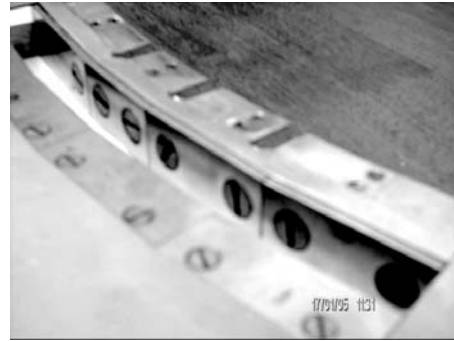


Рис. 21. Магнитный канал № 2, состоящий из четырех секций с различным градиентом при прохождении пучка в магнитном поле с азимутальной вариацией на границе между сектором и долиной

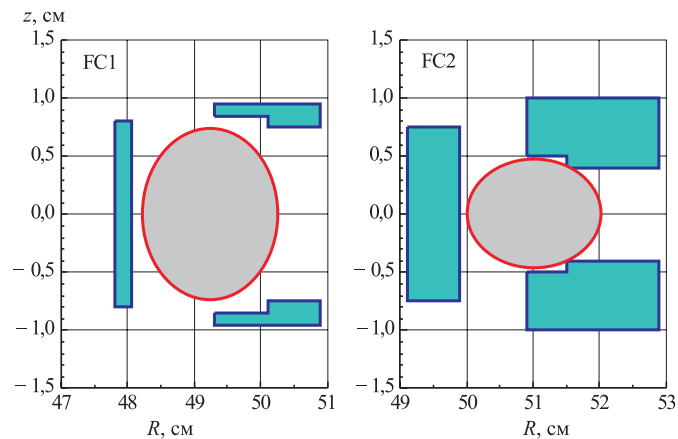


Рис. 22. Поперечное сечение магнитных каналов МС1 и МС2. Овалом выделена область, которую может занимать пучок

мировано магнитное поле в области прохождения пучка внутри каналов, обеспечивающее необходимую фокусировку частиц в процессе вывода. Поперечные сечения обоих каналов представлены на рис. 22, распределение магнитного поля в апертуре второго канала — на рис. 23.

Часть траектории пучка на участке второго канала выходит за край сектора магнита ИЦ-100 и проходит в поле с сильным азимутальным градиентом. Чтобы равномерно скомпенсировать градиентные поля по всей азимутальной протяженности, канал МС2 был разбит вдоль траектории на пять участков с разными градиентами, плавно переходящими один в другой.

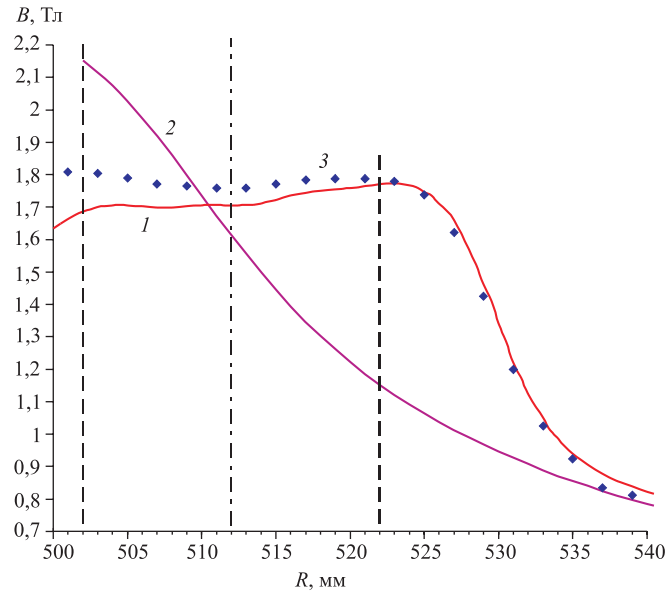


Рис. 23. Распределение магнитного поля по радиусу в апертуре магнитного канала MC2: 1 — спадающий профиль поля без магнитного канала и пологий профиль поля с каналом; 2 — расчет; 3 — после магнитных измерений

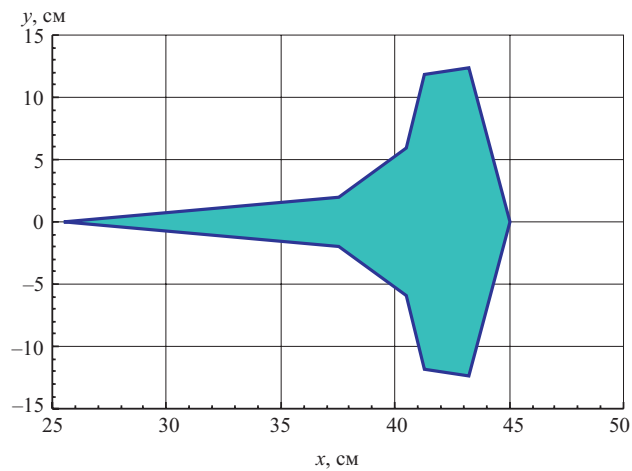


Рис. 24. Геометрия шимм для компенсации влияния магнитного канала

Магнитное поле ИЦ-100 сформировано с помощью железных масс без использования токовых корректирующих катушек. Для компенсации искажений магнитного поля, вызванных установкой двух фокусирующих каналов, использованы дополнительные шиммы. Удачным решением было размещение шимм между первым и вторым каналами — в до-

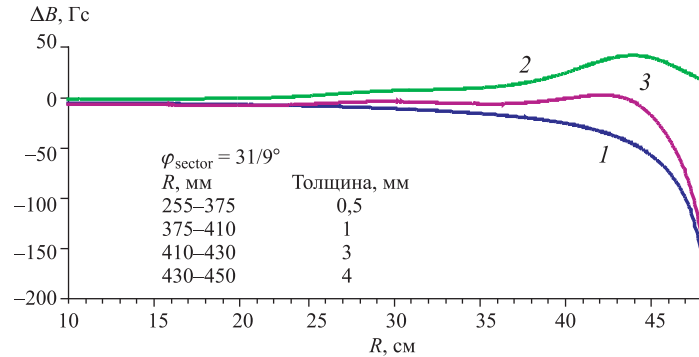


Рис. 25. Компенсация среднего магнитного поля циклотрона при установке магнитных каналов на выводе из ИЦ-100. Показана зависимость уровня магнитного поля от радиуса от центра магнита: 1 — отклонение среднего магнитного поля циклотрона при установке магнитных каналов; 2 — вклад в среднее магнитное поле от шиммирующих пластин; 3 — отклонение среднего магнитного поля циклотрона после установки магнитных каналов и корректирующих шимм



Рис. 26. Фото пучка ионов $^{86}\text{Kr}^{15+}$ после прохождения элементов вывода циклотрона ИЦ-100. Расстояние между вертикальными проволочками 5 мм. Поперечный размер пучка в области вывода не превышает 5×4 мм

лине первого дуанта под плакировками. На рис. 24 представлен профиль дополнительных шимм. Распределение среднего магнитного поля по радиусу до шиммирования и после, а также вклад от корректирующих шимм в среднее поле на орбите показаны на рис. 25. Правильность подбора массы и размеров шимм были проверены путем измерения эффективности прохождения пучка по орбите методом снятия резонансных кривых на различных радиусах (см. рис. 14). Форма и размер пучка по траектории вывода контролировались по изображению на сцинтилляционных пластинах, а также измерялись на профилометрах.

Таблица 2. Распределение интенсивности и эффективность транспортировки ионов при прохождении отдельных участков ИЦ-100

Ток пучка, мкА (Коэффициент прохождения)	$^{40}\text{Ar}^{7+}$	$^{86}\text{Kr}^{15+}$	$^{132}\text{Xe}^{23+}$	Проектная эффективность
Ток после анализирующего магнита (IFC2-диафрагма 20 мм, %)	78 (100)	69 (100)	25 (100)	100
Ток на входе в инфлектор (Эффективность транспортировки от анализирующего магнита до ин- флектора, %)	48 (61)	56 (81)	20 (80)	85
Ток после инфлектора — перед вхо- дом в дуант (Эффективность прохождения ин- флектора, %)	22 (45)	25 (45)	15 (75)	80
Ток пучка на $R = 150$ мм (Фазовый захват без банчера, %)	(10)	(9)	$\sim 1,5$ (10)	10
Ток пучка на $R = 150$ мм (Фазовый захват с банчером, %)	4,4 (20)	3,9 (16)	3,7 (25)	30
Ток пучка на $R = 400$ мм (Эффективность ускорения, %)	2,7 (61)	2,6 (67)	2,7 (73)	70
Ток после дефлектора (Эффективность прохождения де- флектора, %)	1,9 (64)	1,9 (73)	1,8 (67)	70
Ток после магнитных каналов (Эффективность прохождения маг- нитных каналов, %)	1,2 (67)	1,3 (68)	1,2 (67)	80
Ток в первом блоке диагностики ка- нала транспортировки пучка (Трансмиссия начального канала транспортировки пучка, %)	1,2 (99)	1,3 (99)	1,2 (99)	99
Ток пучка в установке для облучения пленки (Трансмиссия канала для облучения полимерной пленки, %)		1,2* (~ 90)	1,1 (~ 95)	99
Суммарная эффективность транс- портировки пучка от ионного источ- ника до мишени, %	~ 3	~ 4	7	8

*Максимальный ток пучка, полученный на мишени, превышает 2 мкА.

После соответствующей настройки положения элементов вывода эффективность транспортировки ионов через дефлектор составила $\sim 70\%$, через магнитные каналы $\sim 70\%$, что близко к расчетным значениям. Зазор между потенциальной и заземленной пластинами равен 10 мм, и дефлектор стабильно работает при напряжении 55 кВ, но в случае необходимости можно длительное время поддерживать напряжение до 60 кВ.

Был сфотографирован пучок ионов $^{86}\text{Kr}^{15+}$ с кварцевой пластины, установленной после первого магнитного канала (рис. 26). На пластине проведены 6 реперных отметок с расстоянием 5 мм между вертикальными линиями. Ближайшая к центру линия находится на радиусе 49,5 см. Размер выведенного пучка на кварцевой пластине не превышает 5 мм по горизонтали и 4 мм по вертикали.

8. СИСТЕМА КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ

Система дистанционного контроля и управления облучательного комплекса ИЦ-100 разработана и изготовлена в Лаборатории ядерных реакций и позволяет полностью автоматизировать процесс управления циклотроном, а также обеспечить получение оператором всей необходимой информации (рис. 27). Управление циклотроном осуществляется в локальной сети Лаборатории. Программное обеспечение построено на платформе операционной системы QNX с использованием SCADA FLEX CONTROL. В ЛЯР также разработана линейка унифицированных контроллеров серии «Smartbox» и все необходимые специализированные блоки. Использование универсальных контроллеров позволило создать гибкую и простую систему с высокими операционными характеристиками. Система управления ИЦ-100 собрана в пяти 19-дюймовых стойках. Управление всей аппаратурой осуществляется с помощью 14 универсальных контроллеров «Smartbox-4». Управление контроллеров осуществляется по последовательным каналам связи.

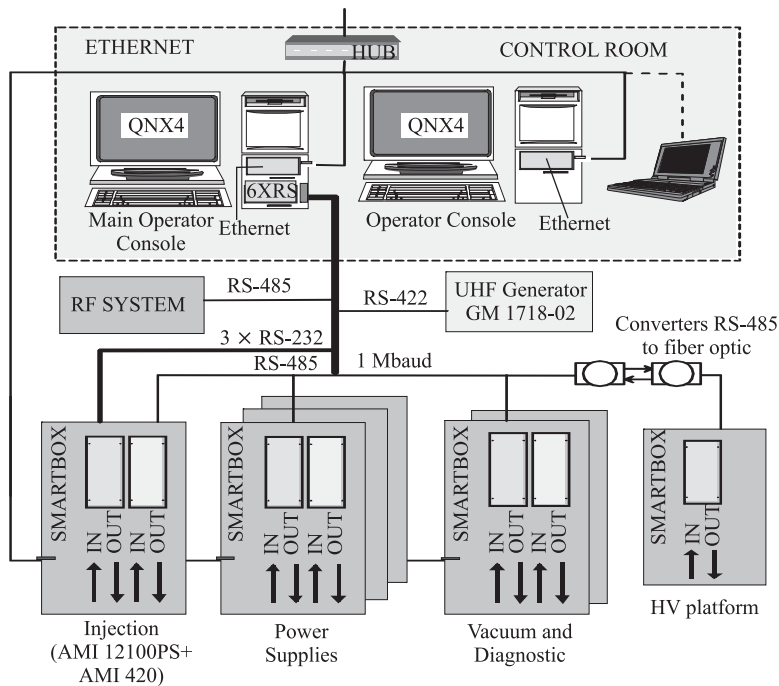


Рис. 27. Структурная схема системы контроля и управления ускорительно-облучательного комплекса ИЦ-100

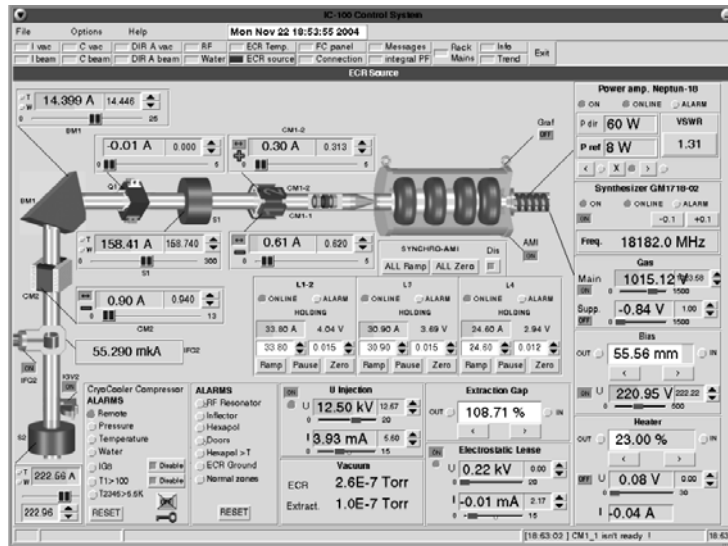


Рис. 28. Панель управления ЭЦР-источником. Фото с компьютера

В качестве примера на рис. 28 приведено фото панели управления ЭЦР-источником с персонального компьютера.

9. СТАБИЛЬНОСТЬ ПУЧКА

В начальной стадии запуска ускорителя было отмечено влияние вибраций от рабочего оборудования на стабильность тока пучка. Механическая вибрация возбуждала колебания штоков дуантов, установленных в ВЧ-резонаторах. Амплитуда колебаний дуантов относительно плакировки достигала 1 мм, а частота ~ 10 Гц. Амплитуда ВЧ-напряжения промодулирована низкой частотой. На дуанты были установлены пружинные компенсаторы с массой 70 г и резонансной частотой 10 Гц, что позволило существенно понизить амплитуду колебаний.

Для независимого питания двух резонаторов циклотрона были установлены два автономных высокочастотных генератора (рис. 29), введена в строй система стабилизации фазы между резонаторами, а также амплитуды ВЧ-напряжения на дуантах. В результате кардинально улучшились стабильность тока и качество пучка в процессе облучения.

В процессе облучения ядерных фильтров общий ток ионов контролируется датчиком пучка с прозрачностью 90 %, установленным на выходе из циклотрона (рис. 30). При однократном прохождении пленки обеспечивается проектная однородность отверстий порядка 10–20 % как в поперечном, так и в продольном направлении. Если требуется избежать влияния пробоев или необходима более высокая однородность облучения, то производится многократное облучение пленки.

На рис. 31 показана долговременная стабильность тока пучка на мишени в процессе облучения пленки при работающей системе сканирования [7]. В качестве мишени использовались два измерительных устройства, расположенных по бокам (справа и слева) от окна облучения. Пленка движется вертикально снизу вверх. Пучок формируется в



Рис. 29. Два ВЧ-генератора для независимого питания двух дуантов

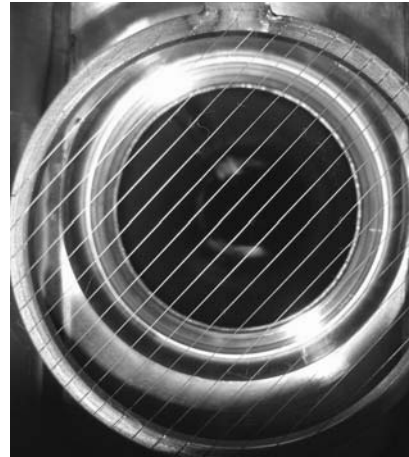


Рис. 30. Измеритель тока пучка в процессе облучения пленки, изготовленный на основе вольфрамовых проволочек. Коэффициент прозрачности более 90 %

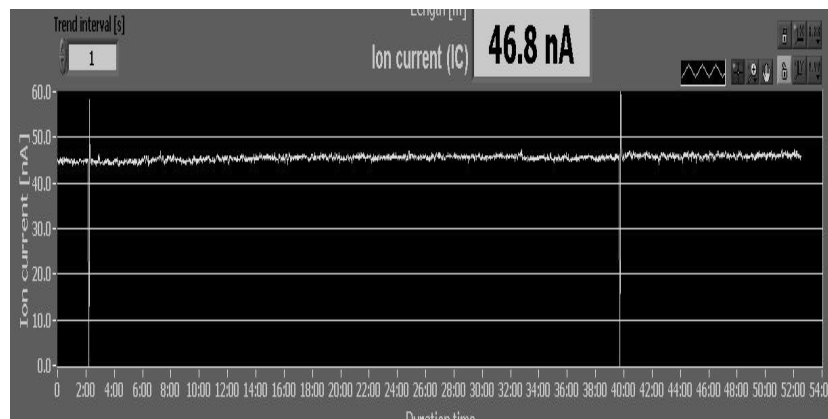


Рис. 31. Долговременная стабильность тока пучка на мишени ИЦ-100 (время облучения 1 ч 10 мин)

пятно, вытянутое в вертикальном направлении на всю высоту окна (200 мм). Размазка пучка осуществляется в горизонтальном направлении таким образом, чтобы перекрыть зону облучения пленки на 100 мм по горизонтали и тем самым обеспечить однородную плотность отверстий по всей пленке. Размер окна облучения составляет 300×200 мм, а при необходимости он может быть увеличен до 600×200 мм. Каждое из измерительных устройств состоит из набора пяти боковых цилиндров Фарадея, вытянутых в вертикальную линейку. На рис. 31 приведена суммарная интенсивность с обеих линеек. Особое внимание было уделено симметрии пучка и ликвидации перекосов тока пучка. В частности, в процессе облучения проводились измерения разности токов между пра-



Рис. 32. Канал для транспортировки пучка к установке для облучения полимерных пленок

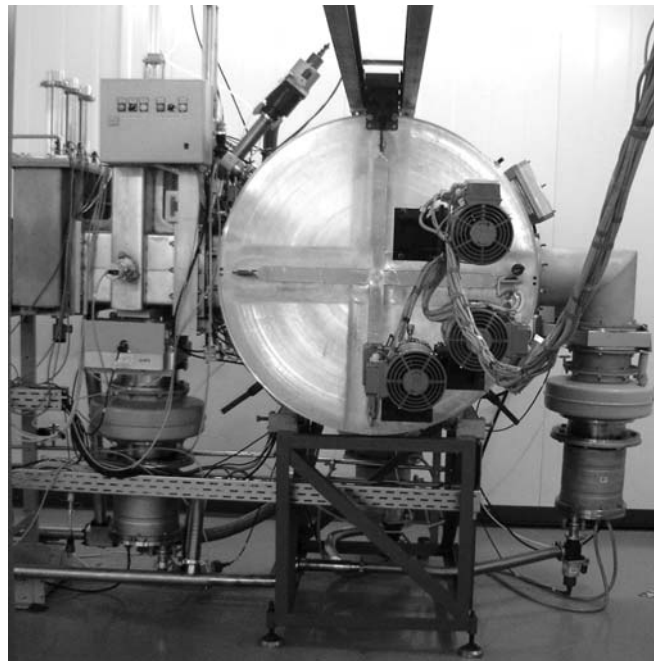


Рис. 33. Установка для облучения полимерной пленки

вым и левым измерительными устройствами. Сигнал рассогласования использовался для подстройки элементов линии транспортировки.

Система автоматической подстройки тока пучка на мишени находится в стадии испытаний. Сигналы с профилометра, установленного на выходе пучка из циклотрона (см. рис. 30), а также с боковых электродов, расположенных слева и справа от поля облучения, используются в системе обратной связи. Стабилизация тока пучка осуществляется путем варьирования тока соленоида S1 в линии инъекции. В течение цикла облучения (порядка 2–4 ч при вращении рулона пленки со скоростью 5–10 см/с) неоднородность плотности отверстий в пленке составляет не более $\pm 5\%$.

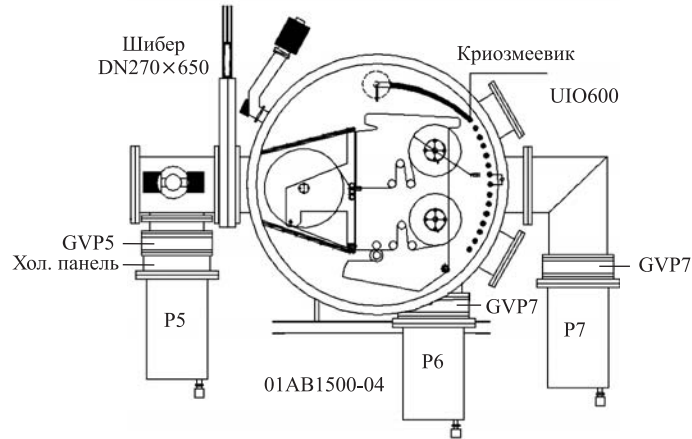


Рис. 34. Камера для производства ядерных фильтров: показаны механизм перемотки пленки, криозмеевик, высоковакуумные турбонасосы P5, P6, P7

Таблица 3. Интенсивности пучков ионов, ускоренных и выведенных на циклотроне ИЦ-100

Элемент	Ион	A/Z	$F_{вч}$, МГц	Ток пучка на мишени в проведенных экспериментах, мкА	Максимальный полученный ток пучка, мкА
Неон	$^{22}\text{Ne}^{4+}$	5,5	20,160	0,7	
Аргон	$^{40}\text{Ar}^{7+}$	5,714	20,200	2,5	
Железо	$^{56}\text{Fe}^{10+}$	5,6	20,240	0,5	
Криптон	$^{86}\text{Kr}^{15+}$	5,733	20,200	2	2,5
Йод	$^{127}\text{I}^{22+}$	5,773	20,200	0,25	
Ксенон	$^{132}\text{Xe}^{23+}$	5,739	20,180	1,2	1,5
Ксенон	$^{132}\text{Xe}^{24+}$	5,5	20,180	0,6	
Вольфрам	$^{182}\text{W}^{32+}$	5,6875	20,142	0,015	0,015
Вольфрам	$^{184}\text{W}^{31+}$	5,9355	20,142	0,035	0,035
Вольфрам	$^{184}\text{W}^{32+}$	5,75	20,142	0,017	0,017

Система дифференциальной вакуумной откачки установлена вдоль канала транспортировки пучка (рис. 32), что позволяет полностью разделить вакуумный объем циклотрона и устройство перемотки пленки. Дифференциальная система состоит из четырех турбонасосов и двух форвакуумных линий. Одна линия предназначена для первичной откачки системы после напуска атмосферы. Вторая линия используется для форвакуумной откачки турбонасосов. В конце линии транспортировки установлен вакуумный барабан с механизмом для облучения пленки (рис. 33). Механизм перемотки пленки и система вакуумной откачки барабана, состоящая из трех турбонасосов, схематически изображены на рис. 34.

В процессе перемотки пленки внутри барабана происходит сильное газоотделение. Для эффективной откачки водяных паров, поступающих в вакуумный объем канала транспортировки, были установлены криоловушки как в линии форвакуумной откачки между форнасосами и турбонасосами, так и перед турбонасосами. Была разработана система криогенных панелей, состоящая из компрессора и развитой поверхности трубок глубокого охлаждения. Криозмеевик будет установлен на задней стенке камеры облучения (рис. 34), что совместно с компрессором PFC550HC позволит увеличить производительность откачки по парам воды до 50000 л/с и тем самым на порядок улучшить вакуум внутри камеры облучения пленки.

В результате настройки и оптимизации канала аксиальной инъекции пучка, системы вывода, ввода в строй новой системы высокочастотного питания была получена эффективность трансмиссии пучка, близкая к расчетной (см. табл. 2), получены интенсивности пучков ионов от Ne до W (табл. 3), обеспечивающие выполнение широкой научной программы на ускорительном комплексе ИЦ-100.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На циклотронном комплексе ИЦ-100 после проведенной модернизации были получены интенсивные пучки тяжелых ионов Ne, Ar, Fe, Kr, Xe, I, W с энергией 1 МэВ/нуклон. Проведены научные исследования по изучению свойств облученных кристаллов, облучение различных полимерных пленок, изготовлено несколько тысяч квадратных метров трековых мембран в широком диапазоне изменения плотности отверстий — от $5 \cdot 10^5$ до $3 \cdot 10^8$ см⁻². На циклотронном комплексе можно решать и другие научно-прикладные задачи.

Продолжаются работы по модернизации отдельных узлов установки с целью повышения надежности в эксплуатации, расширения диапазона ускоряемых ионов, увеличения интенсивности пучков, совершенствования диагностики, отладки системы автоматического контроля стабильности тока пучка на мишени, модернизации системы вакуумной откачки канала для производства фильтров и т. п.

В заключение авторы хотели бы выразить большую благодарность всем сотрудникам ЛЯР ОИЯИ, принимавшим участие в модернизации комплекса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болтушкин В. В. и др. Сообщение ОИЯИ Р9-86-305. Дубна, 1986.
2. Гульбекян Г. Г. и др. Сообщение ОИЯИ Р9-86-785. Дубна, 1986.
3. Гикал Б. Н. и др. Модернизация циклического имплантатора ИЦ-100. Препринт ОИЯИ Р9-2003-121. Дубна, 2003.
4. Efremov A. et al. Status of the Ion Source DECRIS-SC // Rev. Sci. Instr. 2006. V. 77. P. 03A320.
5. Андриянов А. М. и др. Препринт ОИЯИ Р9-85-598. Дубна, 1985.
6. Гульбекян Г. Г., Иванов Э. Л. Препринт ОИЯИ Р9-87-495. Дубна, 1987.

7. Гикал Б. Н. и др. Препринт ОИЯИ Р9-2002-240. Дубна, 2002.
8. Alexandrov V. et al. // Proc. of the Workshop on Space Charge Dominated Beam. Phys. for Heavy Ion Fusion ECR-Sources, RIKEN, Saitama, Japan, Dec. 1998. P. 49.
9. Gikal B.N., Gulbekian G. G., Tikhomirov A. V. // Proc. of EPAC 98, Stockholm, 1998. P. 2199.
10. Tikhomirov A. V., Gulbekian G. G., Kováč P. // J. Vacuum. 1999. V. 52. P. 401.
11. Nakagava T. et al. Production of Highly Charged Metal Ion Beams from Organic Metal Compounds at RIKEN 18 GHz ECRIS // Nucl. Instr. Meth. A. 1997. V. 396. P. 9–12.

Получено 20 февраля 2007 г.