

ПРОЕКТ ЦИКЛОТРОНА ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ DC-110 ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРИМЕНЕНИЯ И ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ НАНОТЕХНОЛОГИЙ

*Б. Н. Гикал, Г. Г. Гульбекян, С. Н. Дмитриев, С. Л. Богомолов,
О. Н. Борисов, И. А. Иваненко, Н. Ю. Казаринов, В. И. Казача,
И. В. Калагин, И. В. Колесов, М. Н. Сазонов, А. В. Тихомиров, Й. Франко*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

В ЛЯР ОИЯИ разработан проект циклотронного комплекса для проведения широкого спектра прикладных исследований в области нанотехнологий (темплетные технологии, трековые мембраны, модификация поверхности и др.). Комплекс включает в себя специализированный циклотрон DC-110, позволяющий получать интенсивные пучки ускоренных ионов Ar, Kr и Xe с фиксированной энергией 2,5 МэВ/нуклон. Циклотрон оборудован системой внешней инжекции с источником ионов ЭЦР-типа, работающим на частоте 18 ГГц. Электромагнит циклотрона с диаметром полюса 2 м обеспечивает рабочее магнитное поле на уровне 1,67 Тл. Фиксированная частота ВЧ-системы равна 15,5 МГц. Вывод пучка из циклотрона осуществляется электростатическим дефлектором. В работе представлены основные параметры циклотрона DC-110.

The project of the DC-110 cyclotron facility to provide applied research in the nanotechnologies (track pore membranes, surface modification of materials, etc.) has been designed by the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions of the Joint Institute for Nuclear Research (Dubna). The facility includes the isochronous cyclotron DC-110 for accelerating the intensive beams of Ar, Kr, Xe ion with 2.5 MeV/nucleon fixed energy. The cyclotron is equipped with system of axial injection having 18 GHz ECR ion source. The cyclotron electromagnet with pole of 2 m diameter creates magnetic field of 1.67 T. The RF system operates at fixed frequency 15.5 MHz. The extraction system is equipped by electrostatic deflector. The main parameters of DC-110 cyclotron are presented in this report.

PACS: 29.20.dg; 29.25.Ni

ВВЕДЕНИЕ

В Лаборатории ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований (г. Дубна, Россия) разработан проект циклотронного комплекса для широкого спектра прикладных исследований в области нанотехнологий. Проект включает в себя специализированный компактный циклотрон DC-110 с инжектором тяжелых многозарядных ионов на базе ионного источника ЭЦР-типа. Циклотронный комплекс предназначен для получения интенсивных пучков ускоренных ионов Ar, Kr и Xe с фиксированной энергией 2,5 МэВ/нуклон, что позволит производить трековые мембраны на основе полимерных пленок толщиной до 30 мкм.

1. ОПИСАНИЕ И КОМПОНОВКА ЦИКЛОТРОНА DC-110

Проект DC-110 основывается на опыте создания и эксплуатации циклотронов ЛЯР ОИЯИ: У-400, У-400М, ИЦ-100, DC-72, DC-60 [1–3]. Для получения на циклотроне DC-110 пучков ионов аргона, криптона и ксенона с фиксированной энергией 2,5 МэВ/нуклон выбран магнит с диаметром полюса 2 м. В качестве ускоряемых ионов приняты $^{40}\text{Ar}^{6+}$, $^{86}\text{Kr}^{13+}$ и $^{132}\text{Xe}^{20+}$, имеющие близкие отношения массы к заряду 6,667, 6,615 и 6,6. Это позволяет реализовать заданные режимы ускорения на фиксированной частоте ускоряющей системы циклотрона 15,506 МГц при изменении уровня магнитного поля в пределах 130 Гс за счет подстройки тока основной катушки электромагнита. Основные параметры циклотрона приведены в табл. 1.

Таблица 1. Основные параметры рабочих режимов циклотрона

Параметры	Ускоряемые ионы		
	$^{40}\text{Ar}^{6+}$	$^{86}\text{Kr}^{13+}$	$^{132}\text{Xe}^{20+}$
Отношение массы к заряду иона, A/Z	6,667	6,615	6,6
Энергия ионов, МэВ/нуклон	2,52	2,52	2,52
Уровень магнитного поля, Тл	1,683	1,67	1,666
Частота ускоряющего напряжения, МГц	15,506	15,506	15,506
Планируемая интенсивность выведенного пучка ионов, мкА (p мкА)	12	13	10
	(2)	(1)	(0,5)

2. СИСТЕМА АКСИАЛЬНОЙ ИНЖЕКЦИИ ПУЧКА

С учетом возможности использования циклотрона DC-110 в промышленном цикле производства трековых мембран в ЛЯР разработан специализированный источник ионов ЭЦР-типа, работающий на частоте 18 ГГц. Напряжение инжекции источника изменяется от 15 до 25 кВ. Получаемый в источнике пучок ионов транспортируется в центр циклотрона по системе аксиальной инжекции (см. табл. 2 и рис. 1).

В состав системы аксиальной инжекции входят соленоиды IS1, IS2 и IS3, квадрупольная линза IQ1, корректирующие магниты IC1 и IC2, анализирующий магнит IM90, синусоидальный банчер IBS, диагностические элементы для измерения параметров пучка IBE и IB1 и вакуумные средства откачки. Для поворота инжектируемого пучка из вер-

Таблица 2. Параметры пучков ЭЦР-источника с частотой 18 ГГц

Ион	A/Z	Максимальная интенсивность пучка, е мкА	Интенсивность пучка в режиме промышленного облучения, е мкА
$^{40}\text{Ar}^{6+}$	6,667	1000	500
$^{86}\text{Kr}^{13+}$	6,615	500	250
$^{132}\text{Xe}^{20+}$	6,6	300	150

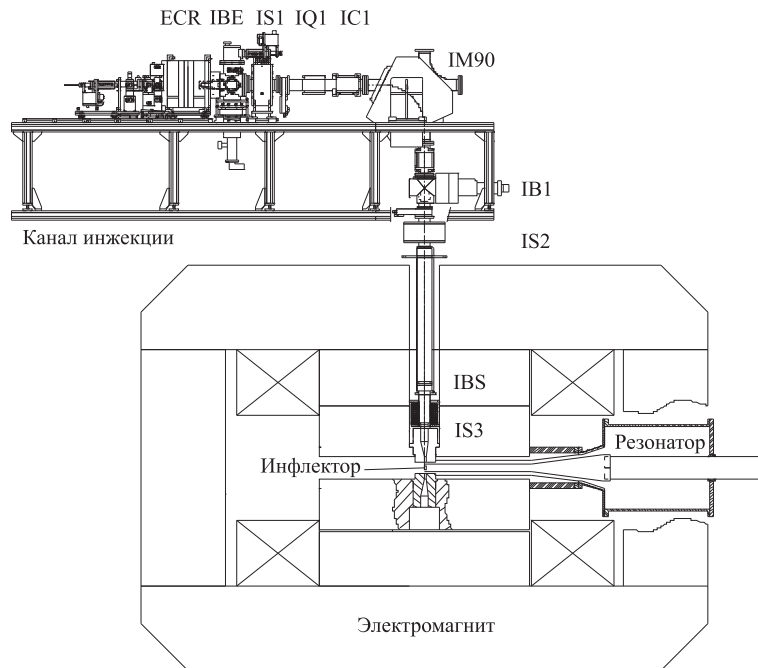


Рис. 1. Схема циклотрона DC-110 с системой аксиальной инжекции

тикального канала в медианную плоскость циклотрона используется электростатический спиральный инфлектор, расположенный в центре циклотрона.

3. ЭЛЕКТРОМАГНИТ ЦИКЛОТРОНА

Магнитная система циклотрона DC-110 создается на базе Ш-образного электромагнита СП-172 с диаметром полюса 2 м (рис. 2). Ведущее и фокусирующее магнитное поле

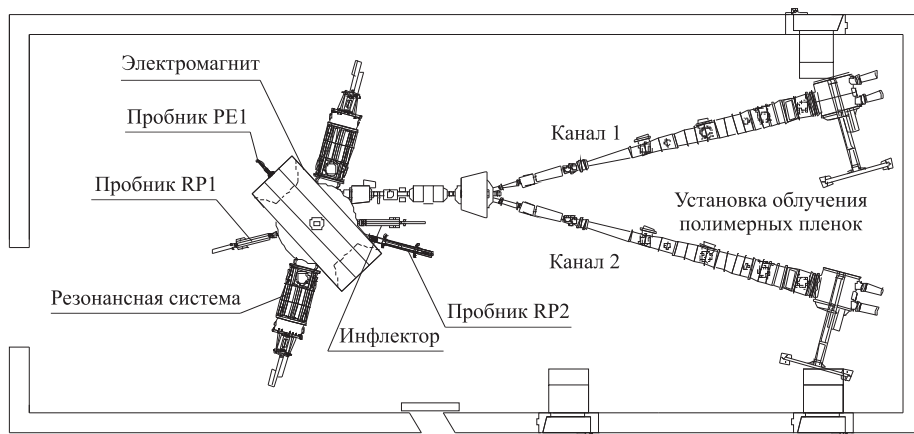


Рис. 2. Расположение циклотрона DC-110 с каналами для облучения полимерной пленки

Таблица 3. Основные параметры магнита циклотрона DC-110

Габариты магнита: длина / ширина / высота, мм	5400 / 2100 / 3840
Диаметр полюса, мм	2000
Зазор между полюсами, мм	224
Количество секторов	4
Зазор между секторами, мм	42
Угловая протяженность сектора, °	51,6
Магнитное поле, Тл	1,67
Флаттер	0,12
Ток основной обмотки, А	1100
Азимутальные корректирующие катушки	2 секции по 2 пары
Масса электромагнита, т	210
Мощность системы питания электромагнита, кВт	37

в рабочем зазоре формируется за счет шиммирования четырех пар секторов и элементов центра. Использование радиальных катушек для оперативной подстройки среднего магнитного поля не предполагается. Для коррекции оптимального положения орбиты на выводном радиусе устанавливаются две сборки азимутальных корректирующих катушек. Флаттер магнитного поля на уровне 0,12 обеспечивает фокусировку пучка ионов в процессе ускорения. Значения частот свободных колебаний $Q_r = 0,11$ и $Q_z = 0,35$ находятся далеко от опасных резонансных значений.

Магнитное поле формируется железными массами (шиммирование секторов и элементов центра) для режима ускорения пучка ионов $^{86}\text{Kr}^{13+}$. Остальные два режима ускорения пучков ионов $^{40}\text{Ar}^{6+}$ и $^{132}\text{Xe}^{20+}$ будут получены только за счет изменения уровня магнитного поля на +130 Гс и -40 Гс относительно исходного. Такое небольшое изменение уровня магнитного поля не приводит к искажению его радиального распределения, а малое отличие в значениях отношения массы к заряду ионов $^{40}\text{Ar}^{6+}$, $^{86}\text{Kr}^{13+}$, $^{132}\text{Xe}^{20+}$ позволяет использовать сформированное изохронное поле для всех трех режимов ускорения без использования радиальных корректирующих катушек. Основные параметры магнита циклотрона DC-110 приведены в табл. 3.

4. ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ СИСТЕМА ЦИКЛОТРОНА

Высокочастотная система (см. табл. 4) циклотрона DC-110 состоит из двух четверть-волновых коаксиальных резонаторов, двух 45° дуантов, петли связи резонатора и фидерной линии генератора, триммера ручной и автоматической подстройки резонансной частоты. Дуанты располагаются в противоположных долинах и имеют между собой пе-

Таблица 4. Общие характеристики ВЧ-системы

Частота обращения ионов, МГц	3,8765
Гармоника	4
Частота ВЧ-поля, МГц	15,506
Количество дуантов	2
Количество генераторов	1
Длина резонатора L , мм	2300
Мощность потерь в каждом резонаторе, кВт	4,16
Напряжение на дуантах, кВ	50
ВЧ-мощность генератора, кВт	20

ремычку в центре циклотрона, что позволяет питать резонансную систему от одного ВЧ-генератора. Роль антидуантов выполняют плакировки долин, в которых расположены дуанты.

5. ВЫВОД ПУЧКА

Электростатический дефлектор с напряженностью электрического поля 55–65 кВ/см будет использоваться для вывода пучка ионов из циклотрона. Он расположен в долине магнита и представляет собой две пластины («септумную» и «потенциальную») с кривизной поверхностей, соответствующей траектории пучка. Расстояние между пластинами 10 мм. Для фокусировки пучка в процессе вывода на участке сильно спадающего магнитного поля циклотрона используется пассивный магнитный канал. Для согласования положения дефлектора и канала с выводной траекторией предусмотрена возможность радиального перемещения входа и выхода дефлектора и канала на ± 15 мм от номинального положения с точностью ± 1 мм. Для настройки системы вывода пучка используется пробник вывода PE1 (рис. 2), расположенный между дефлектором и магнитным каналом. Он предназначен для определения положения, интенсивности и горизонтального размера выводимого пучка перед входом в магнитный канал.

6. КАНАЛЫ ОБЛУЧЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Система транспортировки пучка состоит из двух идентичных каналов с установками для облучения полимерных пленок (рис. 2). Каналы облучения оборудованы вертикальной и горизонтальной системой сканирования пучка, обеспечивающей облучение стационарной мишени размерами 600×200 мм с однородностью распределения частиц по облучаемой площади не хуже $\pm 5\%$. Установка облучения пленки имеет возможность вариации скорости движения пленки от 0,05 до 1 м/с. Система откачки обеспечивает вакуум в камере облучения пленки 10^{-3} – 10^{-4} Торр, а на участке соединения с камерой ускорителя 10^{-6} Торр. Потери пучка из-за перезарядки на остаточном газе в канале не превышают 5%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гикал Б. Н. и др.* Ускорительный комплекс ИЦ-100 для проведения научно-прикладных исследований // Письма в ЭЧАЯ. 2008. Т. 5, № 1(143). С. 59–85.
2. *Gulbekian G. et al.* The Method of the Magnetic Field Formation in Cyclotron DC-72 // Nukleonika. 2003. V. 48, No. 4. P. 207–210.
3. *Гикал Б. Н. и др.* Циклотронный комплекс ДЦ-60 для научно-прикладных исследований и промышленного применения в области нанотехнологий // АЭ. 2007. Т. 103, № 6. С. 357–364.