

СИСТЕМА ИНЖЕКЦИИ ЦИКЛОТРОНА ДЦ-140 ЛЯР ОИЯИ

*Н. Ю. Казаринов¹, В. И. Лисов, В. В. Бехтерев, С. Л. Богомолов,
Г. Г. Гульбежян, А. С. Забанов, И. А. Иваненко, И. В. Калагин,
С. В. Митрофанов, Н. Ф. Осипов, В. А. Семин*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Лаборатория ядерных реакций им. Г. Н. Флерова Объединенного института ядерных исследований продолжает работы по созданию нового многоцелевого комплекса для прикладных исследований, базирующегося на циклотроне ДЦ-140. Система аксиальной инжекции циклотрона ДЦ-140 является модернизацией аналогичной системы циклотрона ДЦ-72. Приводится обзор элементов системы инжекции.

The Flerov Laboratory of Nuclear Reactions of the Joint Institute for Nuclear Research continues the works to create a new multipurpose applied science facility based on the cyclotron DC140. The axial injection system of the DC140 cyclotron is a reconstruction of the DC72 cyclotron one. An overview of the elements of the axial injection system is presented.

PACS 29.20.dg

ВВЕДЕНИЕ

Лаборатория ядерных реакций им. Г. Н. Флерова Объединенного института ядерных исследований продолжает работы по созданию нового многоцелевого комплекса для прикладных исследований, базирующегося на циклотроне ДЦ-140 [1]. Циклотрон ДЦ-140 является модернизацией циклотрона ДЦ-72 [2, 3]. Основные параметры циклотрона ДЦ-140 содержатся в таблице. На физических установках комплекса будут проводиться исследования по радиационной физике, радиационной стойкости материалов и работы по производству трековых мембран с использованием ионных пучков с энергией 2,124 МэВ/нуклон и отношением A/Z в диапазоне от 7,577 до 8,25. Кроме того, пучки ионов (^{16}O , ^{20}Ne , ^{40}Ar , ^{56}Fe , $^{84,86}\text{Kr}$, ^{132}Xe , ^{197}Au и ^{209}Bi) с энергией 4,8 МэВ/нуклон будут использоваться для тестирования микросхем (Single Event Effect testing).

Рабочая диаграмма циклотрона ДЦ-140 показана на рис. 1. Ускорение ионов проводится при постоянной частоте $f = 8,632$ МГц ВЧ-поля при двух значениях гармоника $h = 2, 3$. Первому значению соответствует максимальная энергия ионов, а второму — минимальная. Интенсивность пучка легких ионов ($A \leq 86$) равна 1 мкА частиц, а тяжелых ($A \geq 132$) — 0,1 мкА частиц.

¹E-mail: nyk@jinr.ru

Основные параметры циклотрона ДЦ-140

Параметр	Значение
Радиус полюса (вывода), м	1,3 (1,18)
Магнитное поле, Тл	1,415–1,546
Число секторов	4
Частота ВЧ поля, МГц	8,632
Номер гармоники	2 3
Энергия, МэВ/нуклон	4,8 2,124
Диапазон A/Z	5,0–5,5 7,577–8,25
Напряжение ВЧ-поля, кВ	60
Число дуантов	2
Метод вывода	Электростатический дефлектор
Напряжение дефлектора, кВ	73,5

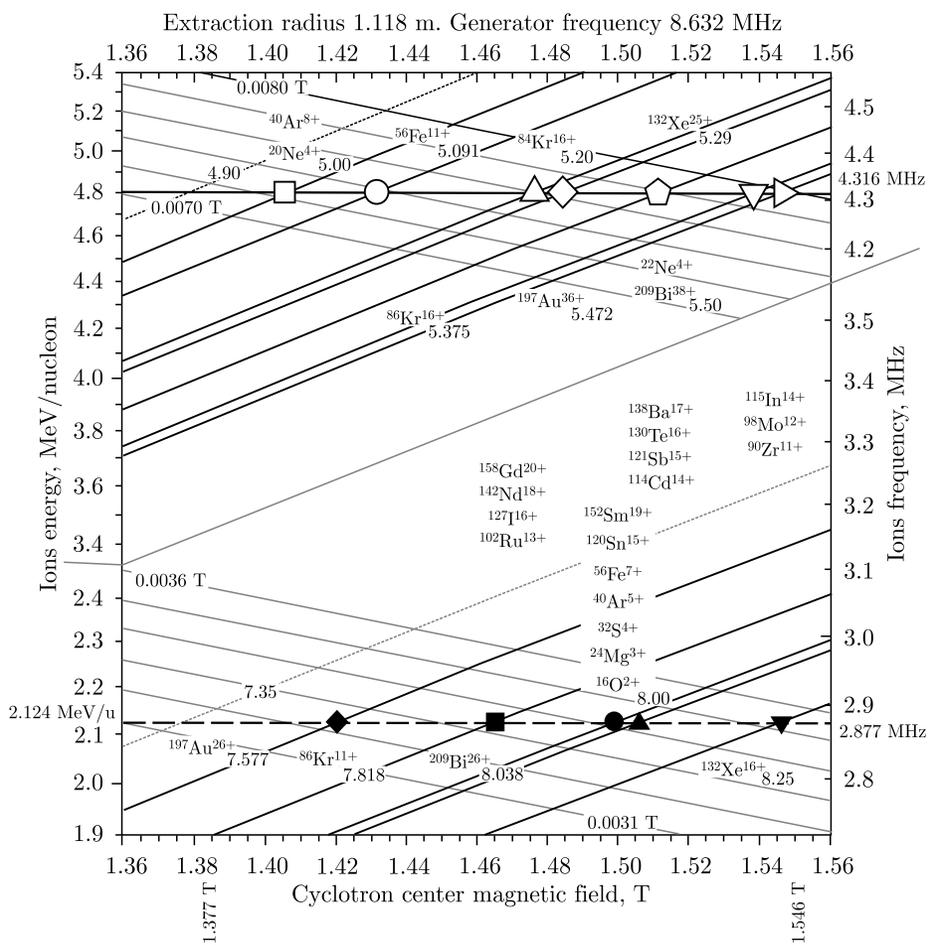


Рис. 1. Рабочая диаграмма ДЦ-140

Система аксиальной инжекции циклотрона ДЦ-140 является модернизацией аналогичной системы циклотрона ДЦ-72 [4]. Далее приводятся обзор элементов системы инжекции и результаты моделирования динамики частиц в канале. Моделирование проведено с помощью пакета программ MCIB04 [5].

ЭЛЕМЕНТЫ СИСТЕМЫ ИНЖЕКЦИИ

Схема системы инжекции приведена на рис. 2. Длина канала равна 5,065 м.

Пучки ионов производятся в теплом ЭЦР-источнике DECRIS-5, разработанном в ЛЯР ОИЯИ [6]. Внешний вид источника показан на рис. 3. Анализирующий магнит M90 (рис. 4) с углом поворота 90° сепарирует инжектируемый пучок. Соленоиды S1–S4 (рис. 5) фокусируют пучок и согласуют его с акцептансом спирального инфлектора I. Корректирующие магниты CM1, CM2 (рис. 6) обеспечивают совпадение траектории центра масс пучка с осью канала. Две диафрагмы CL1, CL2 и цилиндр Фарадея CF используются при анализе спектра пучка. Двугармонический банчер BN увеличивает эффективность захвата пучка в режиме ускорения.

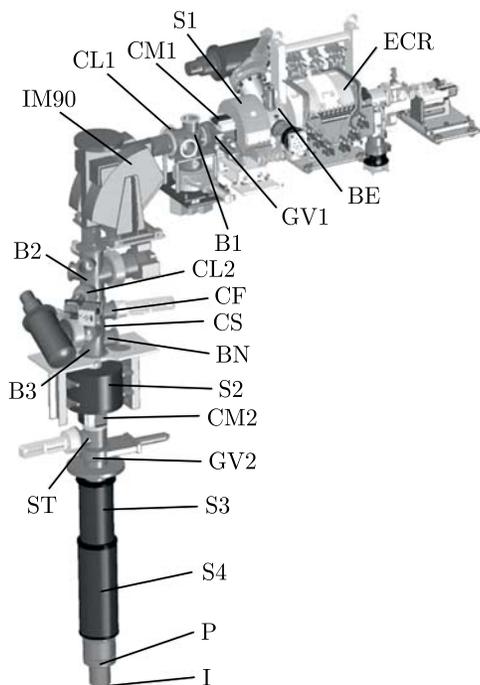


Рис. 2. Схема системы инжекции

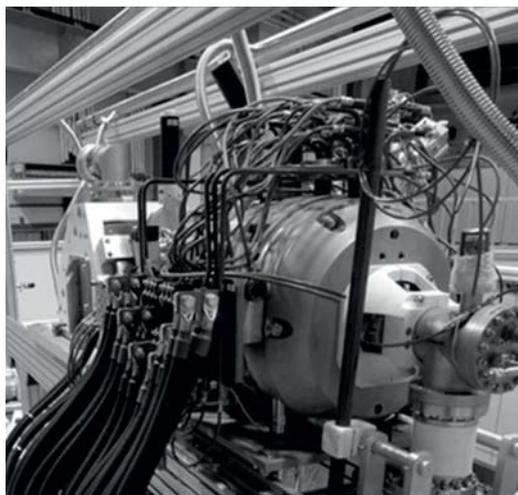


Рис. 3. Источник ионов DECRIS-5

Магнитные элементы канала M90, CM1, CM2, S1–S4. Анализирующий магнит M90 имеет радиус поворота $R_M = 0,4$ м, зазор 108 мм и максимальное магнитное поле 0,2 Тл. Внешний вид магнита показан на рис. 4. Люминофорный экран LF и видеочамера САМ используются для контроля размера пучка в магните.

Максимальное поле магнитов CM1, CM2 (см. рис. 6) равно 0,132 Тл, длина — 0,118 м. Соленоиды S1–S4 являются частью канала аксиальной инжекции циклотрона ДЦ-72 [4]. Внешний вид соленоидов S1–S4 и поле на оси показаны на рис. 5, 7.

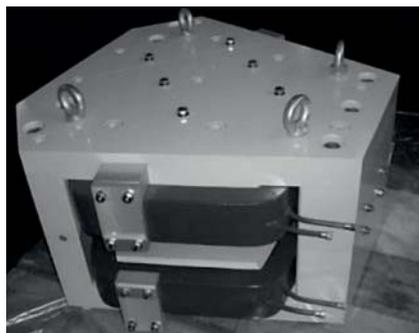


Рис. 4. Магнит M90

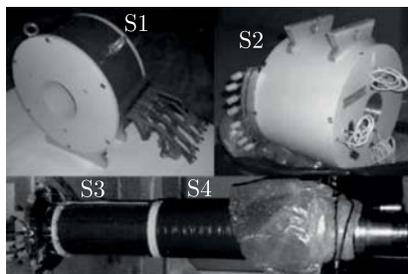


Рис. 5. Соленоиды S1–S4

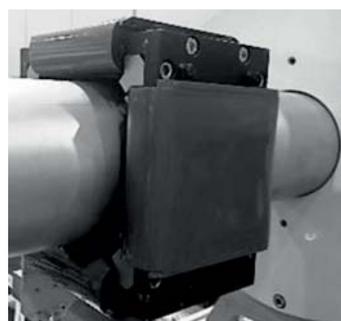


Рис. 6. Корректирующие магниты CM1, CM2

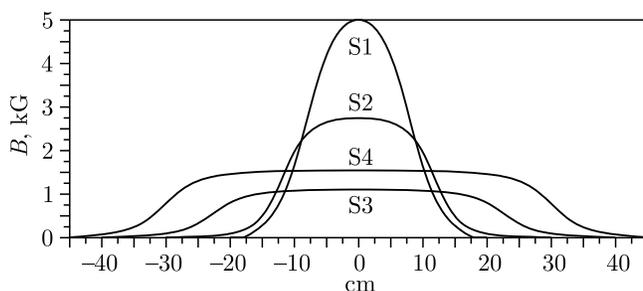


Рис. 7. Поле на оси соленоидов S1–S4

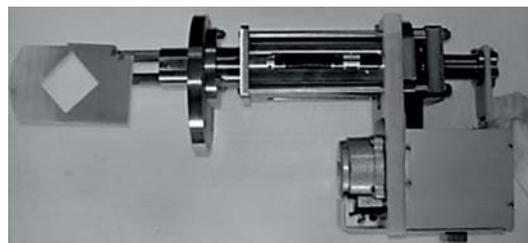


Рис. 8. Диафрагма CL1

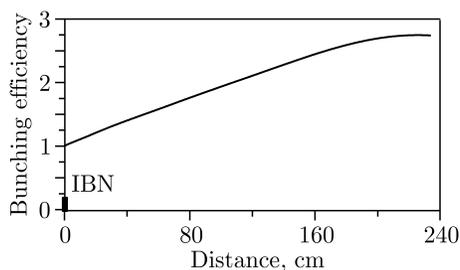


Рис. 9. Эффективность группирования

Диафрагмы CL1, CL2. Две подвижные диафрагмы CL1, CL2 используются для анализа спектра пучка. Первая диафрагма CL1 в форме квадрата со стороной 10 мм (рис. 8) расположена на расстоянии 373 мм перед магнитом M90. Вторая CL2 — щелевая — шириной $5 < d < 10$ мм расположена на расстоянии 100 мм перед цилиндром Фарадея CF.

Двугармонический банчер BN. Для повышения эффективности захвата пучка в ускорение используется двугармонический банчер BN, расположенный вне яра магнита на расстоянии 2,341 м от медианной плоскости циклотрона. Максимальное напряжение на сетках банчера составляет 500 В для инжектируемых ионов, с максимальным A/Z . Эффективность группирования равна 2,75 (рис. 9).

Магнитная пробка Р, инфлектор I, «реперг-пот» РР, стоппер пучка ST. По сравнению с циклотроном ДЦ-72 апертура в магнитной пробке Р увеличена с целью устранения возможных потерь частиц.

Для упрощения работы циклотрона используется только один спиральный инфлектор I с магнитным радиусом 30 мм. Напряжение инжекции U_{inj} меняется от минимального значения 11,55 кВ ($h = 2$, ионы $^{197}\text{Au}^{26+}$) до максимального 18,86 кВ ($h = 3$, ионы $^{209}\text{Bi}^{38+}$).

Устройство «реперг-пот» РР, установленное на горизонтальном участке канала, используется для уменьшения тока пучка.

Стоппер пучка ST размещен между соленоидом S2 и шибером GV2 основного магнита. Он должен полностью прерывать ионный пучок и обеспечивать безопасную работу и техническое обслуживание циклотрона.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКА

Моделирование транспортировки пучка в канале аксиальной инжекции проведено для пучков ионов $^{197}\text{Au}^{26+}$ и $^{209}\text{Bi}^{38+}$, имеющих минимальную и максимальную величину ускоряющего напряжения U_{inj} . Для всех рассмотренных случаев эффективность транспортировки равняется 100%. Огибающие пучков в канале показаны на рис. 10, 11.

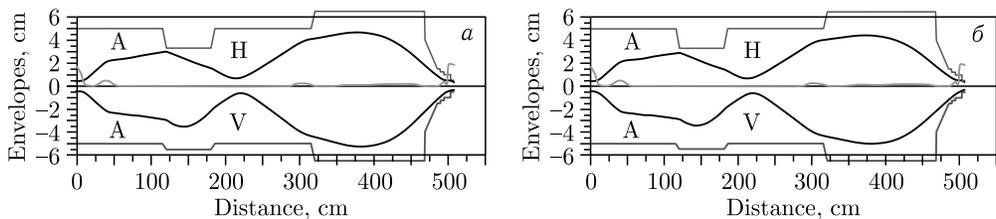


Рис. 10. Горизонтальная (H) и вертикальная (V) огибающая пучка $^{197}\text{Au}^{26+}$ (а) и $^{209}\text{Bi}^{38+}$ (б), апертура канала (А)

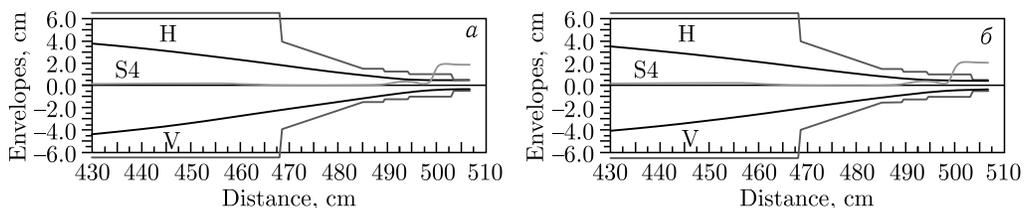


Рис. 11. Огибающие пучка $^{197}\text{Au}^{26+}$ (а) и $^{209}\text{Bi}^{38+}$ (б) вблизи пробки и инфлектора

При анализе спектра пучка выявлено, что эмиттанс пучка уменьшается на диафрагме CL1 в 16 раз, это дает возможность разделить два соседних заряда в спектре пучка с помощью диафрагмы CL2. Огибающие пучка ионов $^{209}\text{Bi}^{38+}$ показаны на рис. 12. Распределения ионов $^{209}\text{Bi}^{37+,38+,39+}$ и примесных ионов $^{16}\text{O}^{3+}$ перед диафрагмой CL2 приведены на рис. 13.

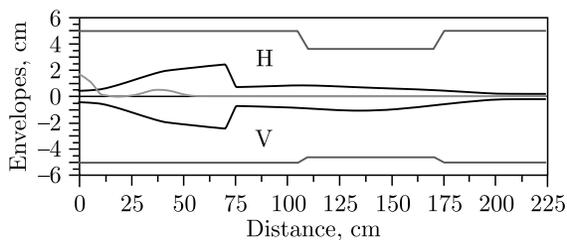


Рис. 12. Огибающие пучка ионов $^{209}\text{Bi}^{38+}$ между диафрагмами CL1, CL2

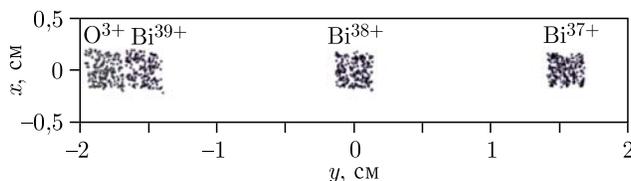


Рис. 13. Распределения ионов ^{209}Bi и ^{16}O перед диафрагмой CL2

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Система аксиальной инжекции циклотрона ДЦ-140 позволяет транспортировать со 100%-й эффективностью все ионные пучки, заявленные в рабочей схеме циклотрона ДЦ-140 ЛЯР ОИЯИ (см. рис. 1). Предлагаемая система анализа спектра пучка дает возможность разделять заряды ионов до значения $Z = 38$. Величины магнитных полей всех оптических элементов канала находятся в расчетном диапазоне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Mitrofanov S. V. et al.* FLNR JINR Accelerator Complex for Applied Physics Researches: State-of-Art and Future // Proc. of the 22nd Conf. on Cyclotrons and Their Appl., Cape Town, South Africa, Sept. 2019. P. 358–360.
2. *Gikal B.N.* Dubna Cyclotrons — Status and Plans // Proc. of the 17th Intern. Conf. on Cyclotrons and Their Appl. (Cyclotrons'04), Tokyo, Oct. 2004. Paper 20A1. P. 100–104.
3. *Gulbekyan G., Ivanenko I., Franko J., Keniz J.* DC-72 Cyclotron Magnetic Field Formation // Proc. of the 19th Russ. Part. Accel. Conf. (RuPAC'04), Dubna, Oct. 2004. Paper WENO12. P. 147–149.
4. *Gulbekyan G.G., Bogomolov S.L., Bekhterev V.V., Kalagin I.V., Kazarinov N. Yu., Khabarov M.V.* Axial Injection Channel of the DC-72 Cyclotron // Ibid. Paper WENO11. P. 144–146.
5. *Aleksandrov V., Kazarinov N., Shevtsov V.* Multi Component Ion Beam Code — MCIB04 // Ibid. Paper THBP09. P. 201–203.
6. *Bogomolov S.L. et al.* Recent Development in ECR Ion Sources at FLNR JINR // Proc. of the 23rd Russ. Part. Accel. Conf. (RuPAC'12), Saint Petersburg, Russia, Sept. 2012. Paper FRYOR01. P. 203–207.