

СИСТЕМА ЭКСТРАКЦИИ ЦИКЛОТРОНА ДЦ-280

EXTRACTION SYSTEM OF CYCLOTRON DC-280

*Д. С. Яковлев, И. В. Калагин, В. А. Семин, К. Б. Гикал, А. А. Протасов, А. А. Лукьянов, П. И. Виноградов,
И. Г. Пищальников, В. И. Миронов*

*D. S. Yakovlev, I. V. Kalagin, V. A. Semin, K. B. Gikal, A. A. Protasov, A. A. Lukianov, P. I. Vinogradov,
I. G. Pishchalnikov, V. I. Mironov*

Объединённый институт ядерных исследований, город Дубна, Московская область, Россия

Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Moscow Region

Ускоритель ДЦ-280 был построен с целью синтеза новых сверхтяжелых элементов с $Z \geq 119$ и детального изучения свойств 112–118 элементов [1]. Циклотрон ДЦ-280 имеет полную эффективность передачи пучка свыше 50 %. Одним из факторов такой эффективности является система вывода, эффективность которой составляет 80 % [2].

Система экстракции состоит из электростатического дефлектора и пассивного магнитного канала.

В процессе эксплуатации были выявлены слабые места конструкции дефлектора. В работе будут представлены результаты исследования эффективности вывода пучка заряженных частиц при использовании двух конфигураций потенциальных электродов.

Введение

Циклотрон ДЦ-280 является базовой установкой «Фабрики сверхтяжелых элементов», построенной для синтеза 119 и 120 элементов таблицы Д. И. Менделеева. Важным фактором для синтеза сверхтяжелых ядер, является интенсивность пучка, которая на данной установке достигает 10 pмкА. Еще одним преимуществом данной установки является высокая эффективность проводки пучка от источника ионов до мишени, которая составляет более 50 %, что позволяет экономить ускоряемое вещество.

Для обеспечения таких показателей система вывода должна обеспечивать высокоэффективный вывод ускоренных пучков положительно заряженных ионов с минимальными потерями. Поскольку ДЦ-280 рассчитан на ускорение пучков с высокой интенсивностью, было принято решение, для вывода пучка использовать электростатический дефлектор.

На рис. 1 представлена схема циклотрона ДЦ-280. На схеме указаны элементы системы вывода и их расположение в камере циклотрона. Конструктивно система вывода пучка заканчивается выводным патрубком системы транспортировки.

В данной работе будет рассмотрен состав системы вывода, причины её малого безостановочного времени работы, мероприятия, проводимые для увеличения времени стабильной работы системы вывода и результаты проведенных доработок.

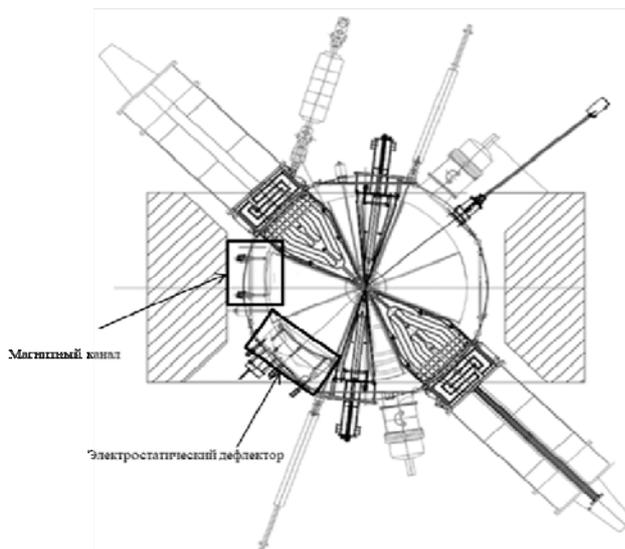


Рис. 1 Схема циклотрона ДЦ-280 с расположением элементов системы вывода

Описание системы вывода

Система вывода предназначена для отклонения пучка из зоны ускорения и его фокусировки на вход в систему транспортировки.

В состав системы вывода входят электростатический дефлектор и пассивный магнитный канал. Электростатический дефлектор изображенный на рис. 2, предназначен для отклонения пучка от орбиты ускорения и направления на вход магнитного канала. Дефлектор располагается на конечных радиусах ускорения. Длина дефлектора составляет 1300 мм. Для вывода пучка в требуемую точку необходимая напряженность электрического поля в апертуре дефлектора до 90 кВ/см. Радиус входа в дефлектор составляет 1780 мм, радиус выхода – 1867 мм. Дефлектор имеет приводы перемещения на входе и выходе, что позволяет регулировать их в диапазоне ± 12 мм относительно центра ускорителя. Вход в дефлектор устанавливается так, чтобы центр пучка совпадал с центром рабочего зазора дефлектора. Выход дефлектора устанавливается так, чтобы выведенный пучок был направлен на вход магнитного канала. Горизонтальная апертура дефлектора составляет 10 мм.



Рис. 2. Электростатический дефлектор

Пассивный магнитный канал изображенный на рис. 3 фокусирует выводимый пучок при его движении до входа в систему транспортировки. Пассивный магнитный канал представляет собой набор стальных элементов, расположенных во внешнем магнитном поле и формирующих необходимую форму магнитного поля для горизонтальной фокусировки пучка. Магнитный канал располагается после дефлектора. Длина канала составляет 900 мм. Фокусирующий градиент магнитного канала может изменяться от 4,6 Т/м до 8,4 Т/м в зависимости от магнитного поля основного магнита. Радиус входа в канал составляет 1980 мм, а радиус выхода – 2100 мм. Магнитный канал так же имеет приводы перемещения на вхо-

де и выходе для регулировки его положение в диапазоне ± 12 мм относительно центра ускорителя. На входе в магнитный канал через изоляторы установлена медная рамка с которой снимается сигнал тока пучка, что позволяет при настройке ускорителя оптимально сфокусировать пучок и минимизировать его потери при прохождении через магнитный канал.

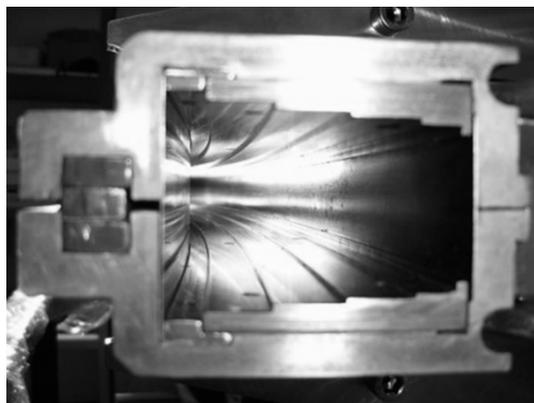


Рис. 3 Поперечное сечение пассивного магнитного канала

Для определения положения пучка ионов и его размеров в системе вывода предусмотрены несколько элементов диагностики, таких как многоламельный токовый пробник и люминофор.

Многоламельный токовый пробник располагается перед входом в магнитный канал. Пробник вывода предназначен для измерения интенсивности, положения и профиля пучка на входе в магнитный канал. Пробник установлен на боковом фланце вакуумной камеры циклотрона и имеет два фиксированных положения. Измерительная головка состоит из 6 изолированных вертикальных ламелей. Измерение тока пучка с каждой ламели дает информацию о положении и размерах пучка в радиальном направлении.

Для визуальной оценки положения выведенного пучка используется люминофор. Люминофор расположен в выводном патрубке на выходе из вакуумной камеры. Люминофор позволяет визуально наблюдать форму выводимого пучка и его положения в начале канала транспортировки.

Ограничение напряжения на дефлекторе

При работе на малых интенсивностях не наблюдалось роста тока утечки дефлектора. На рис. 4 представлена вольт-амперная характеристика снятая до работы ускорителя на высоких интенсивностях. Как видно из данной характеристики, напряжение на электроде поднималось до

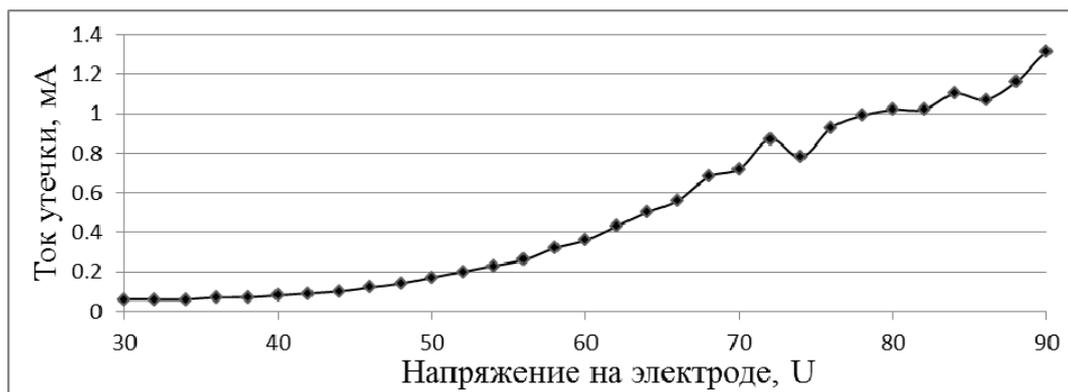


Рис. 4 Вольт-амперная характеристика дефлектора до работы на высоких интенсивностях

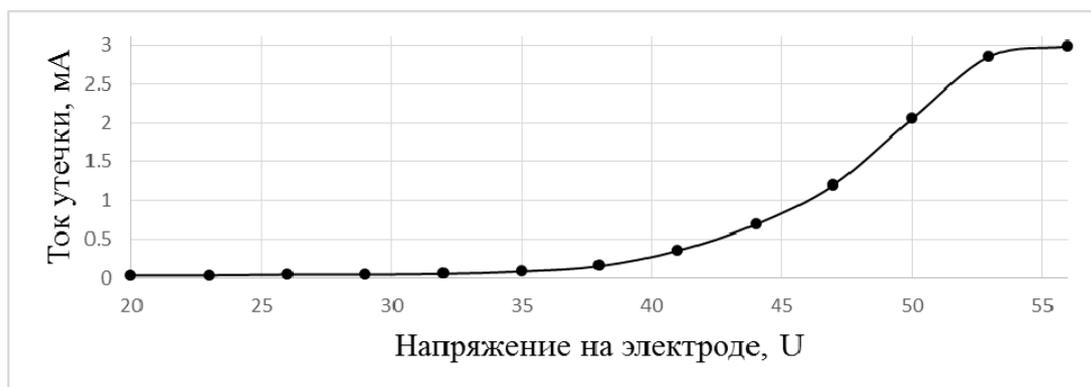


Рис. 5. Вольт-амперная характеристика дефлектора после работы на высоких интенсивностях

проектных значений, при токе утечки менее половины от максимального значения.

После проведения эксперимента на высоких интенсивностях произошло резкое увеличение тока утечки, что не позволило поднимать напряжение до рабочих значений. Эксперимент был проведен с использованием пучков иона $^{48}\text{Ca}^{10+}$. Во время эксперимента ток пучка на мишени составлял 3 pткА в течение месяца, после чего был увеличен до 4 pткА и в таком режиме эксперимент продолжался 14 дней.

На рис. 5 показана вольт-амперная характеристика дефлектора снятая после завершения эксперимента.

Снятая характеристика показала, что ток утечки стал достигать максимума при напряжении 56 кВ без пучка. При попытке дальнейшего увеличения напряжения, фактическое напряжение не поднималось, потому что источник питания переходил в режим стабилизации по току, а не по напряжению. Это привело к невозможности продолжения работы ускорителя.

Частые пробой дефлектора

Также в процессе эксплуатации ускорителя ДЦ-280 увеличилось количество пробоев дефлектора, поскольку в результате воздействия пучка ускоренных ионов на поверхность анода происходит электронно-ионная эмиссия, приводящая к локальным перенапряжениям. Как показано на рис. 6 пробой происходит по направлению силовых полей магнитного поля основного магнита. Они усложняют настройку ускорителя, потому что источник питания после пробоя восстанавливает рабочее напряжение на высоковольтном электроде не мгновенно.



Рис. 6. Пробой между высоковольтным электродом и опорной пластиной

Поиск причин повышенного тока утечки и частых пробоев

По завершению эксперимента дефлектор был извлечен из камеры циклотрона для визуального осмотра и поиска причин увеличившегося тока утечки и участвовавших пробоев.

После извлечения дефлектора было обнаружено, что за время его эксплуатации дефлектора, высоковольтными разрядами была набита канавка с выбросом материала по краям вдоль всей длины высоковольтного электрода, что привело к уменьшению расстояния между опорной пластиной и высоковольтным электродом. Последствия пробоев между электродом и опорной пластиной показаны на рис. 7.



Рис. 7. Следы пробоев на опорной пластине дефлектора

При осмотре извлеченного дефлектора было обнаружено, что на опорных напыление углеродного слоя, как показано на рис. 8. Через данный углеродный слой происходит стекание тока с высоковольтного электрода на заземлённую часть дефлектора.



Рис. 8. Опорные изоляторы с запыленные углеродным слоем

После проведения осмотра дефлектора и камеры циклотрона, не было выявлено явного источника углерода. Одним из возможных источников углерода, является не убранная смазка с резбовых соединений азимутальных катушек.

Было обнаружено расплавление пресептумной пластины из молибдена со стороны входа в дефлектор, что показано на рис. 9. Под воздействием пучков высокой интенсивности часть материала пресептумной пластины расплылась и осела на потенциальном электроде.

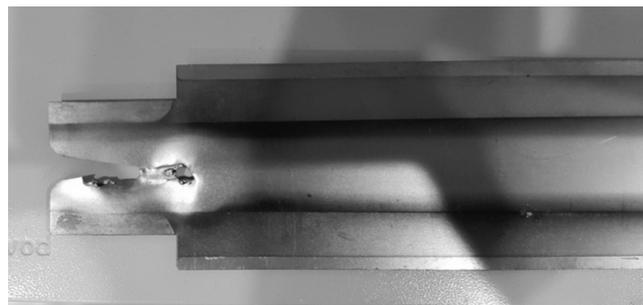


Рис. 9. Расплавленная пресептумная пластина

Доработки дефлектора

В связи с тем, что может возникнуть необходимость в обслуживании дефлектора во время проведения эксперимента, было принято решение изготовить второй дефлектор для безостановочной работы ускорителя.

Поверхности, пострадавшие после пробоев были зачищены для выравнивания плоскости. Для предотвращения деградации опорной пластины нового дефлектора и остановки деградации опорной пластины старого дефлектора, а также на радиальные корректирующие катушки циклотрона были установлены защитные пластины из молибдена.

Для уменьшения тока утечки и количества пробоев был спроектирован и изготовлен высоковольтный электрод с измененным профилем. В высоковольтном электроде новой формы была сделана выборка по всей длине электрода глубиной 0,5 мм, высотой 20 мм. Зазор между электродом и септумом в центральной части сохранился 10 мм. На старом дефлекторе также были почищены лазером опорные изоляторы, для уменьшения тока утечки.

Для предотвращения повторного расплавления пресептумной пластины из молибдена было принято решения изготовить новую пластину из более тугоплавкого материала. В качестве нового

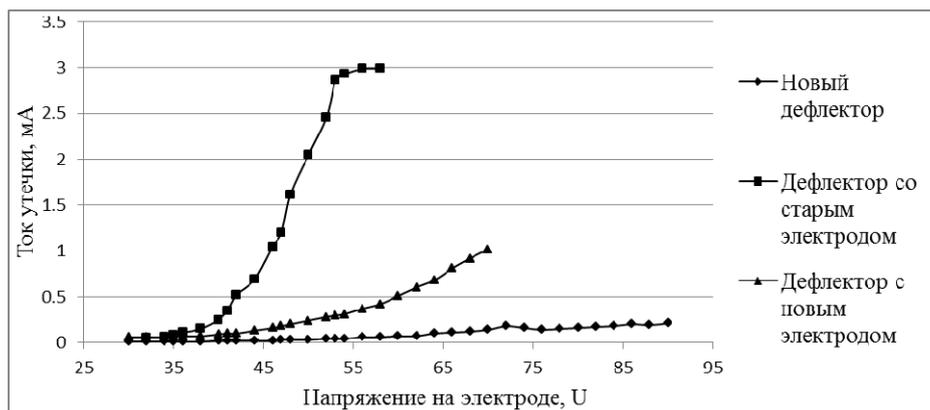


Рис. 10. Сравнение вольт-амперных характеристик дефлектора при различных конфигурациях

Таблица 1

Эффективность системы вывода при различных конфигурациях

Конфигурация	Интенсивность на радиусе вывода (mkA)	Интенсивность в канале транспортировки (mkA)	Ток утечки (mA)	Эффективность системы вывода (%)
Старый дефлектор	22,858	18,478	1,5	80,84
Старый дефлектор с новым электродом	23,896	19,898	0,73	83,27
Новый дефлектор	24,893	21,302	0,62	85,57

материала для пресекуемой пластины был выбран вольфрам.

Результаты проведенных изменений в конструкции дефлектора

После проведения изменений в конструкции дефлектора были значительно уменьшены ток утечки и частота пробоев. На рис. 10 представлено сравнение вольт-амперных характеристик дефлекторов при различных конфигурациях.

После замены потенциального электрода дефлектора была увеличена эффективность вывода пучков.

На установленных защитных молибденовых пластинах опорной пластины дефлектора и радиальных корректирующих катушек не образуются канавки после пробоев, что позволяет избежать увеличения тока утечки по причине выброса материала в месте пробоя.

После вывода пучка $^{48}\text{Ca}^{10+}$ интенсивностью 7,7 pmkA на пресекуемой пластине не было обнаружено следов расплавления и видимых изменений.

Список литературы

1. The experimental research of cyclotron DC-280 beam parameter V. A. Semin†, S. L. Bogomolov, K. Gikal, G. G. Gulbekyan, I. A. Ivanenko, I. V. Kalagin, N. Yu. Kazarinov, V. I. Mironov, L. Pavlov, A. A. Protasov, K. B. Gikal, Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia // 27th Russian Particle Acc. Conf. CERN-Proceedings JACoW-RuPAC2021, DOI: 10.18429/JACoW-RuPAC2021-FRA04.

Start-Up of the DC-280 Cyclotron, the Basic Facility of the Factory of Superheavy Elements of the Laboratory of Nuclear Reactions at the Joint Institute for Nuclear Research. G. G. Gulbekyan, S. N. Dmitriev, M. G. Itkis, Y. Ts Oganessian, B. N. Gikal, I. V. Kalagin, V. A. Semin, S. L. Bogomolov, V. A. Buzmakov, I. A. Ivanenko, N. Yu. Kazarinov, N. F. Osipov, S. V. Pashchenko, V. A. Sokolov, N. N. Pchelkin, S. V. Prokhorov, M. V. Khabarov, K. B. Gikal // Nuclear Research Physics of Particles and Nuclei Letters. 2019. Vol. 16, N 6(225). P. 653–665 http://www1.jinr.ru/Pepan_letters/panl_2019_6/40_Gulbekyan.pdf.