

МОДЕРНИЗАЦИЯ ИНЖЕКЦИОННОГО КОМПЛЕКСА НУКЛОТРОН

*А. В. Бутенко, А. И. Говоров, Д. Е. Донец, Е. Д. Донец,
Е. Е. Донец, К. А. Левтеров, В. А. Мончинский,
А. О. Сидорин, Г. В. Трубников, В. В. Фимушкин*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Инжекционный комплекс нуклотрон предназначен для инъекции в нуклотрон пучков легких и тяжелых ионов с отношением заряда к массе $q/A \geq 1/3$ с энергией 5 МэВ/нукл. и протонов с энергией 20 МэВ. В работе описаны основные направления модернизации лазерного источника ионов легких элементов, источника тяжелых ионов КРИОН, создания нового высокоинтенсивного источника поляризованных ионов и план реконструкции форинжектора.

Injection facility Nuclotron is intended to inject into Nuclotron the beams of light and heavy ions with charge to mass ratio $q/A \geq 1/3$ at the energy 5 MeV/nucleon and the protons at the energy 20 MeV. The basic upgrade directions of laser ion source of light elements and the source of heavy elements KRION, production of new source of polarized particles SPI, preaccelerator's reconstruction plans are described.

PACS: 29.20.-c; 29.25-t

ВВЕДЕНИЕ

Инжектор ионов и протонов нуклотрона включает в себя четыре типа источников ионов (дуоплазматрон, лазерный источник, источник многозарядных ионов КРИОН и находящийся в стадии разработки источник поляризованных ионов), высоковольтный форинжектор, линейный ускоритель ЛУ-20 и каналы транспортировки пучка.

Традиционный дуговой источник типа дуоплазматрон используется для получения протонов, дейтронов и α -частиц.

Лазерный источник легких ионов был разработан в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ в 1973 г. и с 1983 г. применяется для производства таких ионов, как ${}^6\text{Li}^{3+}$, ${}^7\text{Li}^{3+}$, V^{4+} , C^{4+} , N^{5+} , O^{6+} , F^{7+} , Mg^{8+} , Si^{11+} .

Принцип его работы основан на использовании ионов лазерной плазмы, образованной в результате воздействия мощного сфокусированного светового импульса на мишень. В составе источника имеется CO_2 -лазер импульсной мощностью $\sim 10^7$ Вт, что позволяет получить на мишени плотность потока излучения $\sim 10^{10}$ Вт/см².

Криогенные ионизаторы электронно-лучевого типа КРИОН были разработаны в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ в течение 1971–1976 гг., а в 1990-х гг. был предложен и успешно реализован новый тип ионизатора — электронно-струнный источник высокозарядных ионов ESIS (Electron String Ion Source).

В настоящее время КРИОН-2 представляет собой новый вариант электронно-лучевого источника, работающего в режиме электронной струны. Магнитное поле, фокусирующее электронный пучок, создается сверхпроводящим соленоидом. Необходимый для работы сверхвысокий вакуум ($\sim 10^{-12}$ Торр) достигается криогенной откачкой. В 2010 г. на нуклотроне от ESIS КРИОН-2 был получен и ускорен пучок высокозарядных ионов $^{124}\text{Xe}^{42+}$. В дальнейшем на нуклотроне планируется ускорение ионов золота, для чего в источнике необходимо получить пучок ионов золота с зарядностью не менее $^{197}\text{Au}^{65+}$.

Основное направление работ по существенному повышению интенсивности поляризованных пучков протонов и дейтронов связано с разработкой и сооружением нового источника поляризованных ионов (Source of Polarized Ions) на базе оборудования, разработанного для Университета штата Индианы (Блумингтон, США) и переданного в ОИЯИ после закрытия ускорительного комплекса IUCF. Проект источника подготовлен в рамках программы по модернизации нуклотрона, работы ведутся совместно с ИЯИ РАН.

Высокое напряжение до 800 кВ от импульсного трансформатора подается на ускоряющую трубку, соединенную с резонатором ЛУ-20 согласующим каналом. Замена ускоряющей высоковольтной трубки на ускоритель с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (RFQ) позволит не только избавиться от проблем, связанных с высоким напряжением, но и применить другую более мощную систему питания источников, необходимую в связи с их модернизацией.

В данной работе рассмотрены решения тесно взаимосвязанных задач модернизации источников и форинжектора.

ЛАЗЕРНЫЙ ИСТОЧНИК ИОНОВ (LIS)

Первый LIS на форинжекторе ЛУ-20, созданный в 1973 г., включал в свой состав лазер на неодимовом стекле с импульсной мощностью $\sim 5 \cdot 10^9$ Вт, который состоял из генератора и семи квантовых усилителей. Плотность потока излучения на углеродной мишени в эксперименте 1976 г. с использованием данного источника составила $\sim 5 \times 10^{13}$ Вт/см². Полученный пучок ядер углерода из лазерной плазмы был инжесктирован в синхрофазотрон и впервые в мире ускорен до релятивистских энергий [1].

Существенным недостатком, присущим этому лазеру, была малая частота посылок импульсов (~ 1 импульс/мин). Хотя уже в то время имелась возможность создания твердотельного лазера с приемлемой частотой посылок при необходимой мощности, из-за большой его стоимости было принято решение использовать в лазерном источнике гораздо более дешевый газовый CO₂-лазер, который способен работать с частотой посылок, превышающей требуемую для синхротронов ($\sim 0,5$ Гц).

Исходя из поставленной задачи замены твердотельного лазера на CO₂-лазер такой лазер в ЛВЭ был создан. Он состоит из двух головок атмосферного давления с ультрафиолетовой предьонизацией, работающих в режиме свободной генерации. Его основные характеристики: выходная энергия ~ 10 Дж, пиковая мощность ~ 30 МВт, расходимость излучения $\sim 10^{-3}$ рад, размер луча на выходе $\sim 1,8 \cdot 2,5$ см², частота посылок ≤ 1 Гц. Максимальная плотность потока на мишени $\sim 2 \cdot 10^{10}$ Вт/см². С некоторыми модификациями данный лазер работает и в настоящее время.

Современные работы с использованием лазерного источника, например, по созданию источника ионов $^{207}\text{Pb}^{27+}$ для ЛHC [2] или в рамках проекта ИТЕР-TWAC (TeraWatt Accumulation) [3], показали возможность применения CO₂-лазера для производства тяжелых



Рис. 1. Выводной канал 100-Дж CO₂-лазера

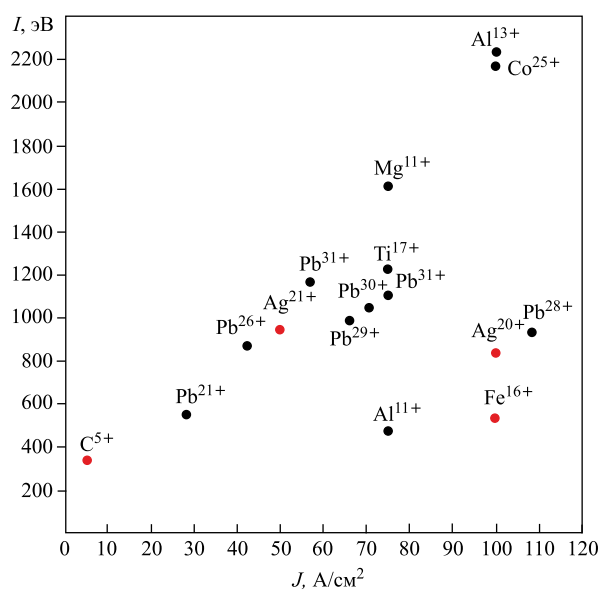


Рис. 2. Зависимость достигнутых с использованием CO₂-лазера потенциалов ионизации, полученных в рамках проекта TWAC (серые точки) и взятых из других публикаций (черные точки), от энергии излучения в импульсе [3]

многозарядных ионов. Это достигается повышением плотности потока излучения на мишени, в основном, за счет увеличения импульсной энергии излучения при сравнительно незначительном укорочении импульса, что приводит к созданию довольно сложных и громоздких лазерных систем (рис. 1, 2).



Рис. 3. Установка с Nd-YAG-лазером с энергией в импульсе 2,3 Дж и длительностью импульса 6–8 нс [7]

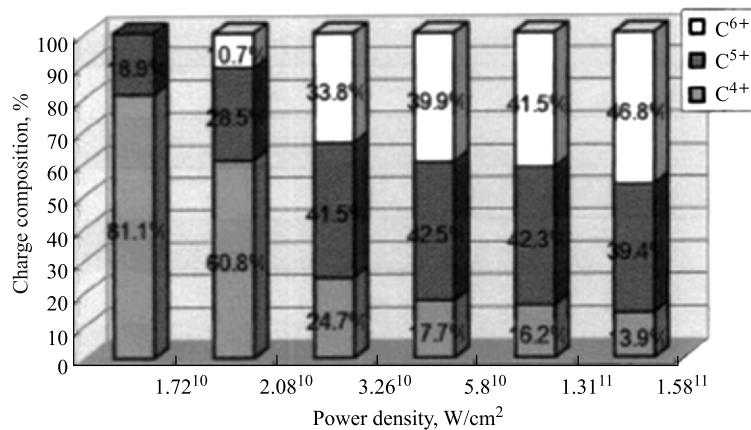


Рис. 4. Зависимость зарядового состава плазмы от плотности потока излучения на мишени (Nd-YAG-лазер — 0,4 Дж, 15 нс) [5]

С другой стороны, с точки зрения задачи получения ядер и ионов легких элементов, достаточную плотность потока излучения на мишени ($\sim 10^{12}$ Вт/см²) можно получить, используя современные неодимовые лазеры на иттрий-алюминиевом кристалле граната (Nd-YAG) с энергией в импульсе ~ 2 Дж и длительностью 6–8 нс, отличающиеся компактностью (рис. 3) и высокой частотой посылок до 100 Гц.

Решение подобной задачи получения ядер углерода для прямой инъекции в RFQ проводилось в рамках проекта DPIS (Direct Plasma Injection Scheme) Токийского института технологий (TITech) и RIKEN (Saitama, JAPAN). Для изучения зависимости зарядового

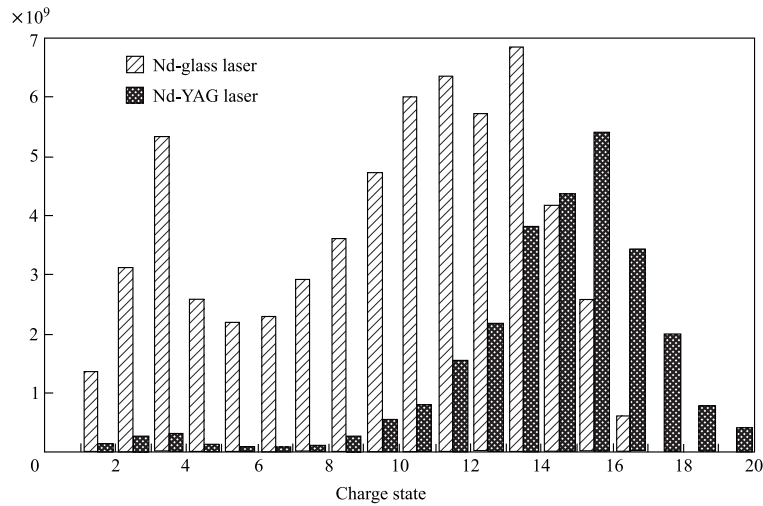


Рис. 5. Зарядовый состав Fe-плазмы, полученной лазерами Nd-glass (3,4 Дж, 35 нс) и Nd-YAG (2,3 Дж, 6–8 нс) [6]

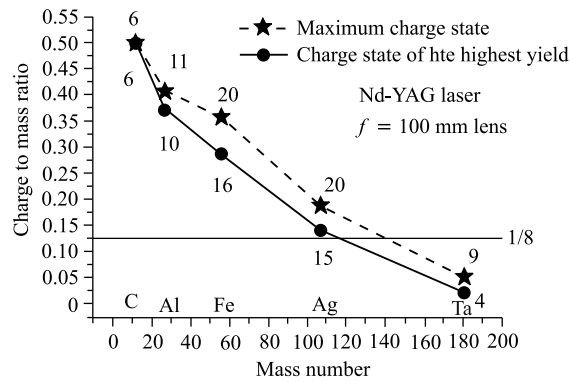


Рис. 6. Зарядовое состояние ионов с максимальной интенсивностью на выходе из RFQ и максимальное зарядовое состояние [7]

состава лазерной плазмы от плотности потока лазерного излучения на мишени были использованы CO₂- и Nd-YAG-лазеры, а также лазер на неодимовом стекле (Nd-Glass-лазер).

CO₂-лазер с импульсной энергией 1,2 Дж и длительностью 85 нс производил углеродную плазму с составом 50% C⁵⁺, 35% C⁴⁺ и 15% C³⁺ [4], в то время как Nd-YAG-лазер с импульсной мощностью 0,4 Дж и длительностью ~ 15 нс мог производить C⁵⁺ и C⁶⁺ (рис. 4).

Сравнение лазерной плазмы, полученной на мишени из железа Nd-Glass-лазером с энергией 3,4 Дж и длительностью ~ 35 нс и Nd-YAG-лазером (2,3 Дж и 6–8 нс), показывает смещение соотношения ионов в сторону высших зарядностей при использовании лазера на кристалле граната [6] (рис. 5).

Данные по зарядовому составу ионов с максимальной интенсивностью на выходе из RFQ [7], полученные с использованием Nd-YAG-лазера (2,3 Дж/6–8 нс) (рис. 6), подтверждают перспективность применения таких лазеров как составной части лазерного источника ядер и ионов легких элементов (рис. 6).

ЭЛЕКТРОННО-СТРУННЫЙ ИСТОЧНИК ИОНОВ КРИОН

В настоящее время действующий источник высокозарядных ионов КРИОН-2 — это электронно-лучевой ионизатор, работающий в отражательном режиме (рис. 7). В обычном пучковом режиме такие ионизаторы используются для получения высокозарядных ионов (в пределе — голых ядер тяжелых элементов). В этих ионизаторах плотные электронные пучки достаточно большой длины (~ 1 м) с диаметром около 1 мм удерживаются сильным продольным полем сверхпроводящего соленоида. В свою очередь, пространственный заряд электронного пучка удерживает введенные в него низкозарядные ионы в течение времени, необходимого им до достижения заданной зарядности за счет ионизации ударом электронов пучка. После этого полученные ионы могут быть выведены из ионизатора и применены в ускорителях частиц или в атомно-физических исследованиях.

Отражательный режим реализуется за счет применения в криогенном ионизаторе электронной пушки и отражателя электронов, специально сконструированных таким образом, что электроны после прохождения через ионизатор не высаживаются на коллектор, а отражаются обратно в направлении эмиттера, при приближении к которому вновь отражаются за счет перекачки части продольной скорости в поперечную. Таким образом, в пространстве дрейфа ионизатора происходит накопление электронов.



Рис. 7. КРИОН-2

Накопленные электроны, подобно электронам пучка, также могут быть использованы для получения высокозарядных ионов электронным ударом. Исследование отражательного режима работы электронно-лучевого ионизатора привело в 1994 г. к открытию в Лаборатории высоких энергий явления электронной струны.

Электронная струна — это устойчивое в определенных условиях стационарное состояние однокомпонентной электронной плазмы, подогреваемой электронами, инжектируемыми вдоль ее оси, которые за счет коллективных взаимодействий получают значительный разброс по энергиям и, после совершения сотен аксиальных осцилляций, дрейфуя поперек магнитного поля, высаживаются на специальных электродах-коллекторах.

Для возникновения электронной струны необходимо накопить в пространстве дрейфа некоторое пороговое количество электронов, зависящее от различных параметров, таких как энергия инжекции электронов, величина магнитного поля соленоида источника, величина магнитной компрессии инжектируемого электронного пучка и др. [8–10].

Криогенный ионизатор КРИОН-2 в струнном режиме трижды (июнь 2002 г., июнь 2003 г., март 2010 г.) использовался в сеансах ускорителя нуклотрон и показал высокую эффективность ионизации, надежность и стабильность в работе, обеспечив инжекцию в линейный ускоритель пучков многозарядных ионов Ag^{16+} , Fe^{24+} и Xe^{42+} , которые затем были ускорены на нуклотроне до релятивистских энергий [11–13].

В рамках проекта NICA необходимы пучки ионов золота Au^{30+} и Au^{51+} , а для существующего ускорительного комплекса нуклотрон — Au^{65+} . Новый источник КРИОН-6Т, создаваемый в настоящее время в ЛФВЭ ОИЯИ, — это криогенный сверхвысоковакуумный ионизатор со сверхпроводящим соленоидом, создающим поле до 6 Тл.

Разработан новый метод ввода рабочих веществ в электронную струну — инжекция производится не от внешнего источника однозарядных ионов, как это делается в других источниках электронно-лучевого типа, а с помощью разработанной и апробированной на источнике КРИОН-2 системы внутренней импульсной инжекции. Ячейка импульсной инжекции атомов золота (длительность инжекции более 20 мс) представляет собой вольфрамовую проволочку с напыленным на нее слоем золота, натянутую вблизи одной из разрезанных трубок дрейфа, находящейся на термине 40 К. Импульс тока через проволочку приводит к нагреву и испарению золота и его проникновению в рабочее пространство и электронную струну.

Для того чтобы уменьшить потери ионов, вызванные их нагревом в электрон-ионных соударениях в течение длительного времени ионизации (при существующих условиях около 1 с для Au^{51+}), была разработана и с успехом испытана технология ион-ионного охлаждения. Атомы/ионы охлаждающего газа должны иметь массу меньшую, чем ионы рабочего газа, и сначала был выбран СО. Ячейка импульсной инжекции представляет собой медный стержень с нанесенным слоем графита. Газы (СО, метан, азот, аргон), предварительно замороженные при 40 К на поверхности стержня, при пропускании импульса тока через графитовую поверхность частично испаряются и проникают в рабочее пространство источника.

Выход ионов при различных временах длительности инжекции охлаждающего газа показывает эффективность ион-ионного охлаждения (рис. 8) [12,13].

В рамках проекта NICA новый источник высокозарядных ионов КРИОН-N(ica), прототипом которого является источник КРИОН-6Т, будет расположен на высоковольтной платформе, изолированной от «земли». На второй изолированной платформе будет размещен компрессор криокулера, охлаждающего соленоид источника КРИОН-N до темпе-

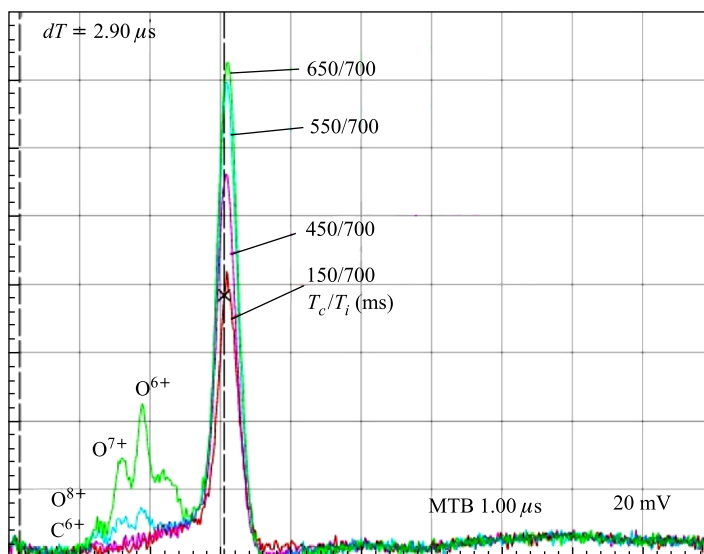


Рис. 8. Выход ионов золота и TOF-спектр, средний заряд 50,2, при разных временах инъекции/удержания охлаждающего газа. Полное время ионизации $T_i = 700$ мс [12]

ратуры 4 К. Компрессор криокулера предполагается механически «развязать» с основной платформой из-за сильной вибрации компрессора, негативно влияющей на работу отдельных систем источника. Потенциалы обеих платформ будут поддерживаться на одинаковом уровне.

ИСТОЧНИК ПОЛЯРИЗОВАННЫХ ИОНОВ

Изучение структуры легких ядер и свойств сильных взаимодействий с использованием пучков поляризованных дейтронов, ускоренных на синхрофазотроне — слабофокусирующем 10-ГэВ протонном синхротроне, началось в Лаборатории высоких энергий с середины 1980-х гг. и продолжалось вплоть до его закрытия в 1992 г. Используемый при этом криогенный источник поляризованных дейтронов ПОЛЯРИС удовлетворял требованию по импульсной интенсивности при многооборотной инъекции в синхрофазотрон, время которой составляло ~ 300 мкс. Поляризованные легкие пучки являются также важной частью программы NUCLOTRON/NICA, которая предполагает их ускорение на нуклотроне, введенном в действие в 1993 г., время однооборотной инъекции которого ограничено ~ 10 мкс. При интенсивности ПОЛЯРИС $3 \cdot 10^{10}$ дейтронов за ~ 500 мкс на выходе ЛУ-20 число инжектируемых в нуклотрон частиц составит в лучшем случае $\sim 10^8$, чего недостаточно не только для физических исследований, но и для мониторинга пучка. Поэтому важное значение приобретает реализация проекта SPI (Source of Polarized Ions), который предполагает разработку и создание универсального высокоинтенсивного источника поляризованных дейтронов и протонов (рис. 9). Интенсивность

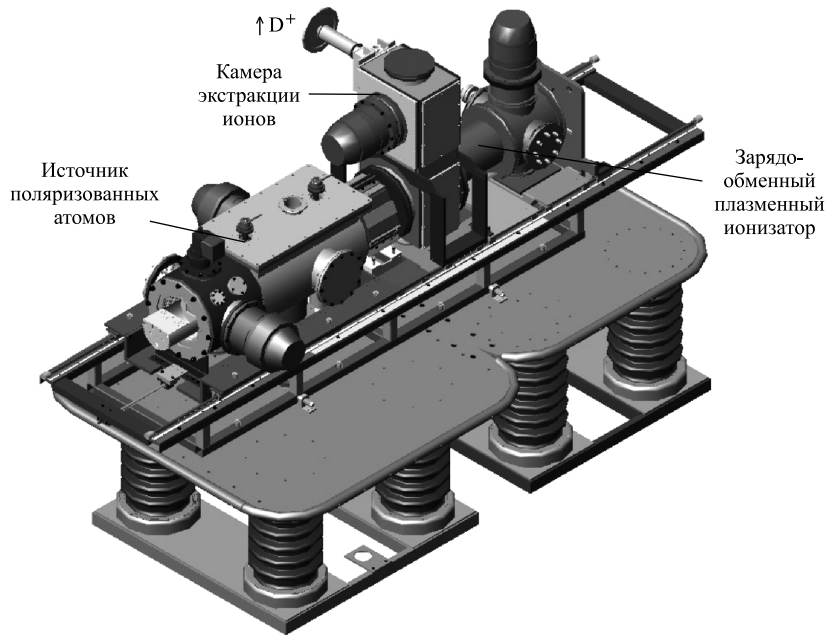
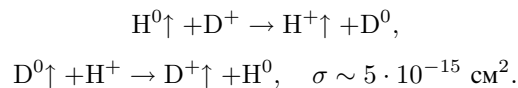


Рис. 9. Предполагаемое размещение источника поляризованных ионов на платформе форинжектора ЛУ-20

ускоренных поляризованных пучков на ускорительном комплексе ОИЯИ должна составить $\sim 10^{10}$ дейтронов/импульс.

Одной из особенностей нуклотрона является возможность работы только с положительными ионами. SPI предполагает модернизацию зарядообменного ионизатора СИРОС, поставленного в рамках договора между ОИЯИ и IUCF (Bloomington, США), в ионизатор с накоплением поляризованных атомов дейтерия и водорода и получением положительно заряженных поляризованных дейтронов и протонов в зарядообменном ионизаторе. В этом случае высокая интенсивность получаемых пучков поляризованных ионов обусловлена большим сечением резонансной реакции перезарядки между поляризованными атомами и неполяризованными ионами при низких (~ 10 эВ) энергиях сталкивающихся частиц:



Использование накопительной ячейки в ионизационном объеме позволяет повысить плотность поляризованных атомов водорода или дейтерия в области ионизации по сравнению со свободным пучком поляризованных атомов (рис. 10) [14].

Проектный ток на выходе SPI для $\text{H}^+\uparrow$ и $\text{D}^+\uparrow$ до 10 мА со степенью поляризации для D^+ и H^+ до 90% от теоретической величины. Важным фактом является то, что деполаризующие резонансы отсутствуют во всем спектре энергий нуклотрона для дейтронного пучка.

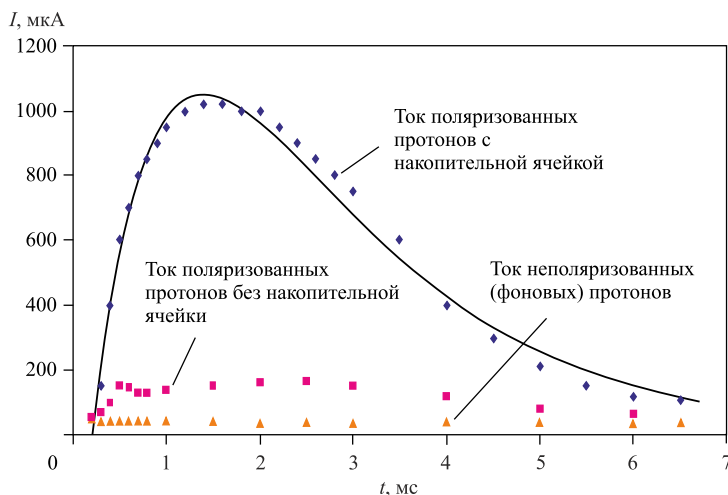


Рис. 10. Динамика поляризованных ионов H^+ из ионизатора с накопительной ячейкой и без нее. Показан также фоновый ток H^+ . Сплошная линия — результаты расчетов [14]

Следует отметить, что электродуговой источник плазмы для SPI может быть использован в качестве самостоятельного источника легких ядер как альтернатива существующему дуоплазматрону, который сейчас работает в режиме непрерывной подачи рабочего газа в ионизационный объем. Требования, предъявляемые к вакууму RFQ, приводят к необходимости либо перейти на импульсную подачу газа, либо сделать вакуумную развязку объемов RFQ и применяемого сейчас дуоплазматрона.

ФОРИНЖЕКТОР

Высокое напряжение от импульсного трансформатора с максимальным напряжением 800 кВ подается на ускоряющую трубку, состоящую из 56 алюминиевых диафрагм, разделенных фарфоровыми кольцами. Диафрагмы соединены с водяным высоковольтным делителем напряжения. Согласующий канал между ускоряющей трубкой и входом в ЛУ-20 состоит из аксиально-симметричной магнитной линзы, группирователя, двойного корректора, датчика тока пучка и цилиндра Фарадея.

Питание источников ионов осуществляется генератором мощностью 5 кВт, двигатель которого находится на «земле» и «развязан» по высокому напряжению с генератором валом из дельта-древесины, по которому и передается крутящий момент.

Замена ускоряющей трубки на RFQ даст возможность снизить потенциал платформы до 150 кВ, что позволит обеспечить питание источников мощностью до 35 кВт, используя компактный разделительный трансформатор.

Для обеспечения необходимого потенциала на ускоряющей трубке канала согласования пучка от источников ионов со входом RFQ понадобится источник стабилизированного напряжения ≤ 150 кВ.

Поскольку на выходе RFQ требуются разные энергии для частиц с $Z/A = 1$ и $Z/A \leq 0,5$ для сохранения режимов ускорения в ЛУ-20 протонов на первой кратности с конечной

энергией 20 МэВ/нукл. и частиц с $Z/A \leq 0,5$ на второй кратности с конечной энергией 5 МэВ/нукл., предполагается использовать два отдельных RFQ, устанавливаемых на входе в ЛУ-20 в зависимости от типа ускоряемых частиц. В целях удобства каждый RFQ будет иметь идентичные линейные размеры и соединительные фланцы. Коэффициент захвата частиц в режим ускорения составит $\sim 82\%$.

ЛИНЕЙНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ АЛЬВАРЕЦА ЛУ-20

Линейный ускоритель ЛУ-20 был запущен в 1974 г. и сейчас является надежным инжектором частиц нуклотрона. Однако с современной точки зрения его конструкция обладает некоторыми недостатками. Одним из недостатков ускоряющей системы ЛУ-20 является наличие дисков, расположенных на трубках дрейфа и служащих для точной настройки распределения напряженности электрического поля вдоль оси резонатора. Нарушение ВЧ-контакта между дисками и трубками может приводить к существенному снижению добротности резонатора. Второй и гораздо более серьезный недостаток связан с конструкцией квадрупольных линз, размещенных в трубках дрейфа. В соответствии с проектом линзы работают в непрерывном режиме, что, с одной стороны, ограничивает максимальную величину градиента поля, а с другой стороны, требует интенсивного охлаждения обмоток, которое осуществляется за счет протока трансформаторного масла. К настоящему времени уплотнения между вакуумной частью резонатора и каналами охлаждения линз многократно выработали свой ресурс и являются потенциальным источником аварийной ситуации.

В начале 1990-х гг. начата модернизация ускоряющей системы ЛУ-20, в рамках которой была разработана новая конструкция трубок дрейфа. Благодаря низкой скважности работы ЛУ-20 было решено использовать линзы в импульсном режиме работы. Новая конструкция линз основана на трапецеидальной форме полюсных наконечников, что позволило увеличить число витков в обмотках и поднять градиент поля примерно до 100 Тл/м. Кроме того, в новой конструкции на трубках отсутствуют диски, приводящие к снижению добротности резонатора. Одиннадцать новых трубок дрейфа изготовлены, протестированы на измерительном стенде и установлены в резонаторе.

По экономическим причинам модернизация ускоряющей системы ЛУ-20 не была завершена, и замена оставшихся трубок дрейфа будет осуществлена в ходе создания комплекса NICA. Кроме изготовления и установки в резонаторе новых трубок дрейфа, модернизация ускоряющей структуры включает разработку и изготовление импульсных источников питания линз.

Система ВЧ-питания, предназначенная для возбуждения электромагнитного поля в основном резонаторе и резонаторах группирователя и дебанчера, основана на двух ВЧ-генераторах «Родонит» с максимальной мощностью до 3 МВт каждый.

В настоящее время лампы, используемые в модуляторах анодного напряжения и мощных выходных каскадов генераторов, сняты с производства. В связи с этим в ближайшее время планируется замена модуляторных ламп на твердотельные ключи, а генераторных ламп воздушного охлаждения ГИ-42Б на еще выпускаемые небольшими партиями лампы водяного охлаждения ГИ-27А.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Модернизация лазерного источника позволит повысить зарядность некоторых легких ионов, а в случае углеродной мишени получить ядра, что даст возможность снизить вводимую в резонатор ЛУ-20 ВЧ-мощность. Введение в действие нового источника поляризованных ионов и модернизированного источника многозарядных ионов КРИОН-6Т расширит спектр ускоряемых на нуклотроне частиц для физических исследований.

Замена ускоряющей трубки и импульсного трансформатора ИТ-800 на ускоритель с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой позволит обеспечить питание новых источников с использованием компактного разделительного трансформатора большой мощности на напряжение 160 кВ. Завершить работы по модернизации планируется к началу 2014 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Baldin A. M. et al.* Upgrades of the Nuclotron Injector for Acceleration of Ions with $Z/A = 0.28$ // Proc. of the LINAC 96. P. 352–354.
2. *Kondrashev S. et al.* New Developments of Laser Ion Source for Ions Synchrotrons // Proc. of EPAC 2004, Lucerne, Switzerland, 2004.
3. *Ivanov S., Shatunov Yu.* // Beam Dynamic Newslett. 2010. No. 53.
4. *Okamura M. et al.* 60 mA Carbon Beam Acceleration with DPIS // Proc. of 2005 Particle Accel. Conf., Knoxville, Tennessee, USA, 2005.
5. *Kashivagi H. et al.* ND-YAG Laser Ion Source for Direct Injection Scheme // Rev. Sci. Instr. 2004. V. 75, No. 5.
6. *Okamura M. et al.* Direct Plasma Injection Scheme in Accelerators // Rev. Sci. Instr. 2008. V. 79. P. 02B314.
7. *Kanesue Takeshi et al.* Ag Acceleration Using Direct Plasma Injection Method // Proc. of EPAC, Edinburg, Scotland, 2006.
8. *Donets E. D.* Electron Beam Ion Sources in the Reflex Mode of Operation (Review and Progress Report) // Rev. Sci. Instr. 2000. V. 71. P. 810.
9. *Donets D. E. et al.* Evolution of Argon K X-Ray Spectra during the Ions Confinement in Electron Strings // Phys. Scripta. 1999. V. T80. P. 500.
10. *Donets E. D. et al.* A Study of Electron Strings and Their Use for Efficient Production of Highly Charged Ions // Rev. Sci. Instr. 2000. V. 71. P. 896.
11. *Donets D. E. et al.* Use of EBIS in the String Mode of Operation on the Nuclotron Facility in JINR // Rev. Sci. Instr. 2004. V. 75. P. 1543.
12. *Donets D. E. et al.* Production and Ion–Ion Cooling of Highly Charged Ions in Electron String Ion Source // Rev. Sci. Instr. 2009. V. 80. P. 663304.
13. *Donets D. E. et al.* Production of Highly Charged Ion Beams Kr^{32+} , Xe^{44+} , Au^{54+} with Electron String Ion Source (ESIS) Krypton-2 and Corresponding Basic and Applied Studies // JINST. 2010. V. 5. P. C09001; <http://iopscience.iop.org/1748-0221/5/09/C09001>
14. *Belov A. S. et al.* // Proc. Intern. Workshop on Polarized Gas Targets and Polarized Beams, Urbana, IL, USA, 1998. V. 421. P. 362.