

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИСТОЧНИКА МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ «КРИОН-6Т» НА ИНЖЕКЦИОННОМ КОМПЛЕКСЕ NICA: МНОГОКРАТНАЯ ИНЖЕКЦИЯ ИОНОВ ТЯЖЕЛЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Д. Н. Рассадов¹, А. Ю. Бойцов, Е. А. Бутенко, С. В. Гудков, Д. Е. Донец,
Е. Д. Донец, Е. Е. Донец, Н. А. Малышев, Д. О. Понкин,
А. Ю. Рамздорф, В. В. Сальников, В. Б. Шутов

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Электронно-струнный ионный источник «Крион-6Т» является основным устройством для получения тяжелых ионов для инжекционного комплекса NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility). Источник был создан в Лаборатории физики высоких энергий ОИЯИ и несколько раз использовался как источник тяжелых ионов в инжекторе нуклотрона. В рамках четвертого этапа пусконаладочных работ (ПНР) комплекса NICA в 2022–2023 гг. ионы Xe^{28+} , полученные с помощью ESIS «Крион-6Т», были ускорены на ускорительном комплексе ЛУТИ (линейный ускоритель тяжелых ионов) – бустер (бустерный синхротрон) – нуклотрон. Дальнейшее развитие источника ионов требует получения пучков ионов $\text{Xe}^{32+ \div 34+}$, $\text{Bi}^{35+ \div 37+}$ и их многократной инжекции в RFQ-ЛУТИ и далее в бустер и нуклотрон. В источнике «Крион-6Т» получены ионы Xe^{28+} в многоимпульсном режиме (до 10 импульсов в серии) с интервалом 100 мс между импульсами. В ближайшем будущем предполагается накопление и электронное охлаждение серии ионных импульсов в бустере; это позволит увеличить интенсивность ионного пучка в ускорителе на порядок. Предполагается, что время полного цикла ускорения в комплексе NICA составит 4–6 с. Представлены апробированный метод инжекции атомов висмута в источник «Крион-6Т» и первые стеновые результаты по получению пучков высокозарядных ионов висмута Bi^{37+} .

Electron string ion source (ESIS) “Krion-6T” is a main device for heavy ions production for the NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility) injector. The ion source was created at the Laboratory of High Energy Physics, JINR, and it was used several times for heavy ion beams production at the Nuclotron injector. Recently, Ar^{13+} and Xe^{28+} ion beams produced with the “Krion-6T” ESIS have been accelerated in the HILAC (Heavy Ion Linac)–Booster (booster synchrotron)–Nuclotron session in the framework of the fourth stage of commissioning of the NICA complex. Further development of the ion source requires the production of $\text{Xe}^{32+ \div 34+}$, $\text{Bi}^{35+ \div 37+}$ ion beams and their multiple injection through RFQ-HILAC into the Booster and the Nuclotron. Currently, Xe^{28+} ion beams have been produced in the “Krion-6T” ESIS in a multipulse mode (up to 10 pulses per series), extracted from the ion source with an interval of 100 ms between pulses. In the near future, the accumulation and electronic cooling of this series of the ion pulses in the Booster synchrotron is proposed. This should allow increasing the intensity of the ion beam in the Booster by an order of magnitude. The time of the acceleration cycle in the NICA complex is assumed

¹E-mail: rassadov@jinr.ru

to be 4–6 s. An approved technology for bismuth atoms injection into the “Kрион-6Т” ion source is reported, and the first stand results of Bi^{37+} ion beams production are briefly presented and discussed.

PACS: 29.20.–с; 25.27.–q

ВВЕДЕНИЕ

Источник высокозарядных ионов «Крион-6Т» [1], работающий в отражательном режиме, или режиме «электронной струны», является основным источником высокозарядных ионов в инжекционном ускорительном комплексе NICA ЛФВЭ ОИЯИ.

Источник «Крион-6Т» в мае 2022 г. был впервые установлен на высоковольтную платформу нового линейного ускорителя тяжелых ионов (ЛУТИ) ЛФВЭ ОИЯИ, который позволяет ускорять пучки тяжелых ионов до энергии 3,2 МэВ/нуклон. В сентябре 2022 г. начался четвертый сеанс пусконаладочных работ (ПНР-4) на инжекционном комплексе NICA, который включает ионный источник, линейный ускоритель ЛУТИ, синхротроны бустер (энергия до 530 МэВ/нуклон) и нуклотрон (энергия до 4,2 ГэВ/нуклон). Источник «Крион-6Т» отработал практически без сбоев непрерывно в течение 5,5 мес (работа ускорителей в течение 3200 ч). Получены и ускорены пучки ионов $^{124}\text{Xe}^{28+}$, которые после обдирки на фольге на выходе бустера при энергии 205 МэВ/нуклон далее инжестировались в нуклотрон уже как ядра $^{124}\text{Xe}^{54+}$. В результате достигнута рекордная для нуклотрона интенсивность пучка ядер ксенона (свыше 10^7 ядер за цикл), ускоренных до энергии 3,9 ГэВ/нуклон, и выработана стратегия получения интенсивных пучков тяжелых ионов для последующей инжекции в коллайдер NICA. Одним из ключевых элементов этой стратегии является многократная инжекция ионных пучков из источника в бустер. Детали описаны ниже в разд. 1.

Для получения ионов различных элементов в ионном источнике необходимо доставить определенное количество атомов рабочего вещества в зону ионизации. В источниках ионов «Крион» ранее [2–6] были получены ионы благородных газов, углерода, железа, тулия, золота. При этом инжекция осуществлялась различными способами, которые вкратце описаны в разд. 2. Там же детально обсуждена технология инжекции атомов висмута в ионную ловушку источника «Крион-6Т», которая была успешно реализована в стендовых экспериментах. В этих стендовых экспериментах на источнике «Крион-6Т» получено порядка $\sim 2 \cdot 10^8$ ионов Bi^{37+} в импульсе.

1. УСКОРЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ НА ИНЖЕКЦИОННОМ КОМПЛЕКСЕ NICA

В рамках четвертого этапа ПНР на инжекционном комплексе NICA в источнике «Крион-6Т» были получены пучки ионов аргона (в качестве тестовой настройки комплекса) и ксенона. Полный ионный импульс Xe из источника составлял 2,5 нКл при полном времени ионизации ~ 19 мс (плюс 9 мс инжекция). Зарядовый спектр выведенного ионного пучка был измерен с помощью поворотного магнита на выходе ЛУТИ (ускорение осуществлялось только в RFQ) и представлен на рис. 1; на долю целевой зарядности Xe^{28+} приходится ~ 20 – 25 %, что составляет $\sim 1 \cdot 10^8$ ионов. Отметим, что в стендовых экспериментах на источнике «Крион-6Т» удавалось получить

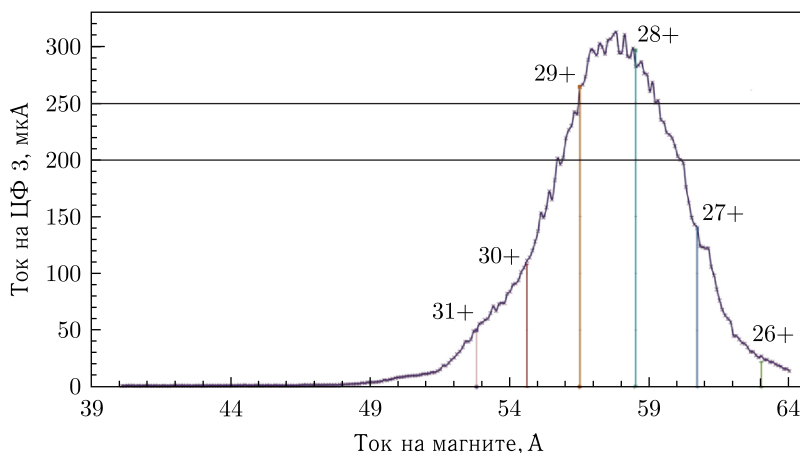


Рис. 1. Зарядовое распределение ионов ^{124}Xe , измеренное после поворотного магнита ЛУТИ. По вертикальной оси — измеренный ионный ток на цилиндре Фарадея после поворотного магнита

в 2–3 раза больше ионов в импульсе, так что потенциал увеличения интенсивности в импульсе еще имеется.

Полученное количество ионов в импульсе после ускорения в нуклотроне оказалось более 10^7 ядер Xe^{54+} за цикл с учетом потерь на всей ускорительной цепочке. Этого оказывается вполне достаточно для проведения физических экспериментов на выведенных пучках, в частности, в рамках экспериментов коллаборации VM@N (Varyonic Matter at Nuclotron). Но этого недостаточно для выхода на запланированную интенсивность в нуклотроне и, соответственно, в кольцах коллайдера NICA.

Для достижения запланированной светимости в коллайдере NICA порядка $L \sim 10^{27} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ необходимо накапливать в кольцах коллайдера $\sim (1-2) \cdot 10^9$ тяжелых ядер типа Xe^{54+} или Bi^{83+} в каждом сгустке, выведенном из нуклотрона. Для того чтобы повысить количество ионов в каждом ионном импульсе в нуклотроне, предлагается осуществить многократную инжекцию пучков ионов из ионного источника и их накопление в бустере с использованием электронного охлаждения на энергии инжекции в бустер. Для этого необходимо накопить в бустере 10–20 ионных импульсов из «Криона». Электронное охлаждение позволяет охладить ионы за ~ 100 мс, что определяет частоту инжекции в 10 Гц. Поскольку продольное охлаждение в бустере значительно быстрее поперечного, предполагается использовать именно продольное охлаждение инжектированных ионных сгустков. В этом случае орбита бустера будет разделена на две примерно равные части: одна часть для уже инжектированных и охлажденных сгустков, а другая для вновь инжектированных. Это ограничивает сверху временную растяжку пучка, выведенного из «Крион-6Т», на уровне ~ 4 мкс. В настоящее время длина ионного импульса, выведенного из источника, составляет $\sim 10-15$ мкс на полувисоте (см. рис. 4.) Для уменьшения времени вывода в настоящее время создается принципиально новая структура вывода ионов, которая позволит выводить ионы за требуемые ~ 4 мкс. Детали будут представлены позднее в отдельной публикации.

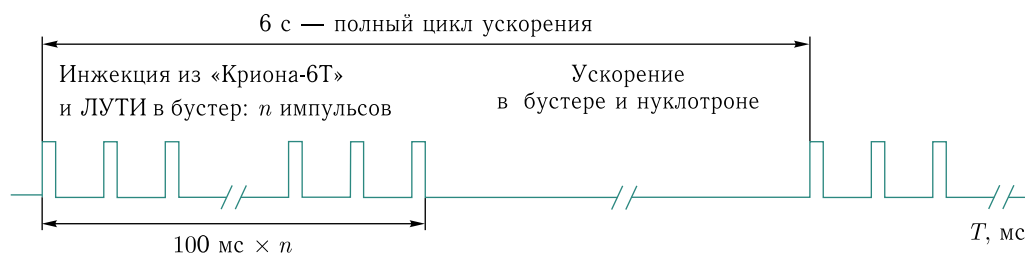


Рис. 2. Временная схема работы ионного источника «Крион-6Т» и ускорительного комплекса в режиме многократной инжекции ионов в бустер

В режиме многократной инжекции бустер будет заполняться 10–20 последовательными порциями ионов с интервалом 100 мс между порциями и с длительностью каждого импульса ~ 4 мкс. Накопленный ионный сгусток предполагается ускорить в бустере вплоть до энергии ~ 530 МэВ/нуклон. Далее на этой энергии будет производиться обдирка ионов на фольге, после чего пучок уже ядер будет инжектирован в нуклотрон для ускорения до энергии нескольких ГэВ/нуклон и инжекции в кольца коллайдера NICA. Общий период (цикл) ускорения составит ~ 4 –6 с.

Временная схема работы ионного источника в режиме многократной инжекции представлена на рис. 2. Для получения, например, Xe^{28+} время инжекции составляет около 9 мс, последующее время ионизации ~ 19 мс, далее — вывод ионов из источника и пауза 72 мс, после чего — следующая порция «инжекция – ионизация – вывод ионов». Таким образом, предполагается осуществить серию из нескольких (10–20) выведенных из «Крион-6Т» ионных импульсов с интервалом в 100 мс для их последующего накопления в бустере. Подобная схема многократной инжекции от источника ECR в кольцо LEIR апробирована в ЦЕРН [7].

Стеновые эксперименты показали, что ионный источник «Крион-6Т» может обеспечить многократную инжекцию 10–20 ионных импульсов с интервалом 100 мс без потери интенсивности в каждом из серии ионных импульсов (в сравнении с одиночным выведенным импульсом). Тем не менее работа ионного источника в таком режиме потребовала определенных технологических изменений.

Дополнительный разогрев эмиттера быстрыми электронами в течение времени ионизации — известное явление в электронно-струнных источниках. Быстрые электроны, энергия которых превышает потенциал электронной пушки, возникают в результате незатухающей неустойчивости, которая обеспечивает поддержание электронной струны с определенным распределением электронов по скоростям [6]. Дополнительный нагрев эмиттера ведет к росту эмиссии электронов и срыву устойчивого режима. Для преодоления этого эффекта было осуществлено динамическое уменьшение накала эмиттера в течение серии импульсов. На рис. 3 показана принципиальная схема работы системы уменьшения накала эмиттера в рабочем режиме получения серии ионных импульсов Xe^{28+} с интервалом 100 мс между импульсами.

В результате получена последовательность ионных импульсов ксенона со средней зарядностью Xe^{28+} и с интервалом в 100 мс между импульсами. На рис. 4 показаны типичные измеренные сигналы с ионного коллектора на выходе из «Криона-6Т», т. е. полный ионный ток Xe на ионном коллекторе в каждом из 10 выведенных ионных импульсов.

Инжекция 9 мс + ионизация 19 мс
 Ожидание следующего импульса 72 мс
 При этом во время импульса уменьшается накал эмиттера по следующему закону:
 в течение 64 мс каждую миллисекунду
 накал уменьшается на 3 единицы

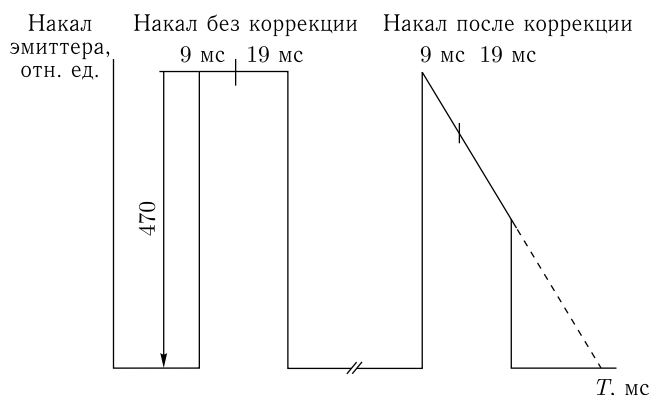


Рис. 3. Динамическая корректировка накала эмиттера электронного пучка источника «Крион-6Т» в режиме многократной инжекции ионов в бустер. Слева показан накал эмиттера без коррекции, справа — накал эмиттера в результате действия динамической коррекции

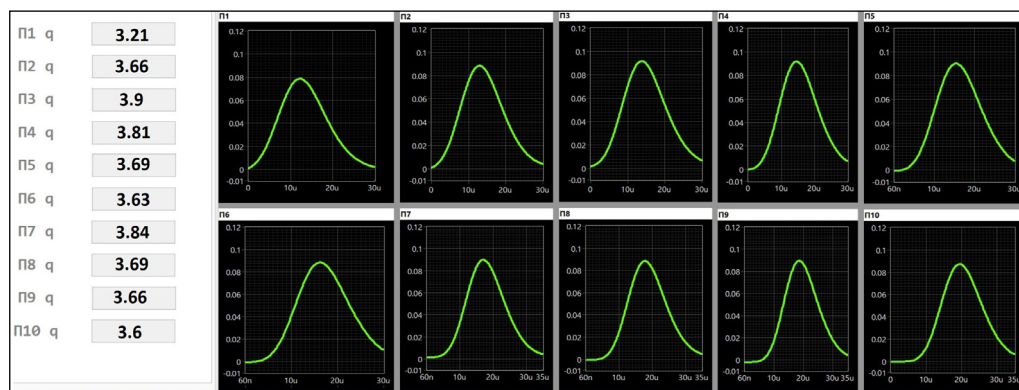


Рис. 4. Форма ионного импульса и полный заряд (в нКл) в каждом импульсе серии из 10 ионных импульсов ^{124}Xe , последовательно выведенных из «Крион-6Т» через каждые 100 мс и измеренных на ионном коллекторе. По вертикальной оси показан ионный заряд в относительных единицах, измеренный на ионном коллекторе, по горизонтальной оси — время в мкс. В таблице слева показан полный измеренный заряд в каждом из 10 ионных импульсов в нКл

Измерения сигналов с ионного коллектора производились с помощью цифрового осциллографа Lecroy HDO4034AR, подключенного к компьютеру через сеть Ethernet. Разработанная программа управления измерениями и визуализацией сигналов обеспечила мониторинг всех измеренных ионных импульсов в каждой серии из 10–20 импульсов.

Отметим, что полный ионный заряд в импульсе остается практически постоянным и равным общему выведенному из источника заряду в режиме одиночных импульсов. Полученные результаты позволяют рассчитывать, что при успешном накоплении, охлаждении и ускорении 10–20 последовательных ионных импульсов в бустер-нуклотроне результирующее полное число тяжелых ионов в сгустке, инжектируемое в коллайдер NICA, предположительно должно достигнуть расчетного значения для комплекса NICA ($\sim (1-2) \cdot 10^9$).

2. ИНЖЕКЦИЯ ТВЕРДЫХ ВЕЩЕСТВ И ПОЛУЧЕНИЕ ИОНОВ ВИСМУТА

Инжекция газов в источник «Крион-6Т» естественно осуществляется непосредственной подачей соответствующих нейтральных атомов или молекул через прецизионный натекатель в секцию инжекции, находящуюся при температуре жидкого азота. Секции инжекции находятся как со стороны электронной пушки, так и со стороны электронного отражателя. Инжекция предпочтительна со стороны отражателя, так как при инжекции со стороны электронной пушки некоторое количество тяжелых низзарядных ионов может высаживаться на поверхность эмиттера электронов, что приводит к частичному «отравлению» эмиттера, т.е. ухудшению его эмиссионных свойств.

Для получения пучков ионов углерода C^{6+} в сеансе 2018 г. на нуклотроне в секции инжекции источника «Крион-6Т» через натекатель подавался метан (CH_4). Для получения ионов железа в сеансе 2003 г. на источнике «Крион-2М» использовался достаточно летучий порошок ферроцен ($Fe(C_5H_5)_2$), который располагался непосредственно внутри азотной секции (в количестве ~ 50 мг) и нагревался до температуры $\sim 0^\circ C$ [5].

Для получения ионов золота внутри секции инжекции источника «Крион-2М» размещалась тонкая вольфрамовая проволока, покрытая золотом, через которую импульс подавался электрический ток [6]. При разогреве проволоки атомы золота частично испарялись с поверхности проволоки и попадали в электронный пучок. Недостатком такой схемы является недостаточное для продолжительных экспериментов время работы устройства и трудоемкий процесс замены вольфрамовой проволоки.

Для инжекции атомов висмута была выбрана тигельная система подачи рабочего вещества в ионный источник (рис. 5). При этом необходимо отметить, что использование тигельной системы в источнике «Крион-6Т» сталкивается с серьезными технологическими сложностями из-за гелиевой температуры сверхпроводящего соленоида и магнитного поля до 5 Тл в непосредственной близости от области инжекции.

Температура ячейки, где происходит испарение висмута, составляет порядка $500^\circ C$ (давление паров висмута при этой температуре ~ 1 Па). Так как ячейка находится внутри азотной структуры источника и, соответственно, внутри сверхпроводящего соленоида, реализовать подобную схему с более высокими температурами тигля, например, для испарения атомов золота до $\sim 950^\circ C$, оказалось невозможным.

Ячейка представляет собой трубку с внутренним диаметром 4 мм, изготовленную из нержавеющей стали, являющуюся также элементом структуры дрейфа ионного источника (рис. 6). Непосредственно объем, где находится висмут, соединен с трубкой дрейфа и нагревается с помощью нихромовой нити в кварцевой изоляции. Для

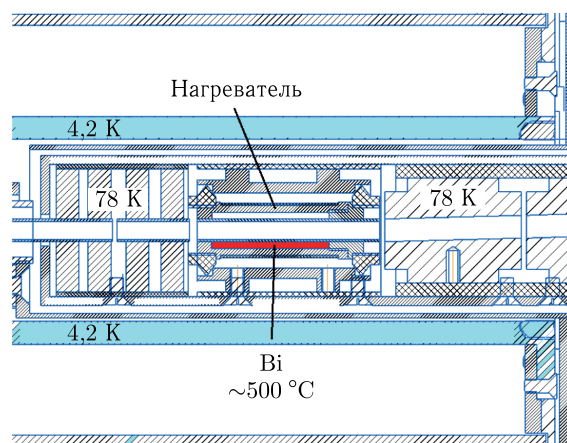


Рис. 5 (цветной в электронной версии). Схема устройства для подачи атомов висмута в область ионизации ионного источника. Красным цветом показана область, в которой находится висмут, жидкий при температуре 500 °С

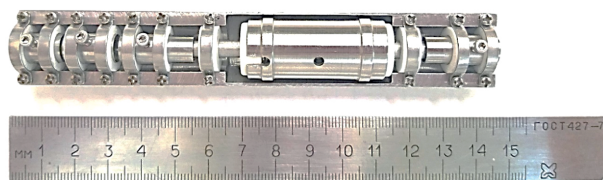


Рис. 6. Ячейка нагрева и инъекции висмута без экранов и нагревателя, смонтированная для установки в область инъекции висмута

уменьшения теплового излучения от нагревателя был установлен набор экранов из тонкой нержавеющей стали. А для теплоизоляции от азотной структуры и электрической развязки ячейки от потенциала «земли» трубка была установлена на изоляторах из обрабатываемой керамики.

Нагрев ячейки осуществлялся от источника питания, размещенного на потенциале структуры дрейфа (до +3 кВ относительно «земли»), который управлялся по оптоволоконной связи и обеспечивался питанием через изолирующий трансформатор. Мощность нагрева при работе составляла ~ 10 Вт.

По результатам стендовых экспериментов на источнике «Крион-6Т» был получен полный заряд $\sim 3\text{--}4$ нКл в выведенном ионном пучке висмута в импульсе со средней зарядностью Bi^{37+} ; это соответствует $\sim 2 \cdot 10^8$ ионов целевой зарядности Bi^{37+} с учетом того, что в зарядовом спектре висмута такой целевой зарядности с необходимостью присутствуют также две зарядности ниже и две — выше целевой. В этих стендовых экспериментах время инъекции висмута составляло 3,9 мс, время ионизации — 30,0 мс, средняя энергия электронов — 5 кэВ, отражательное напряжение — 9,9 кВ. Рассчитанная эффективная плотность электронной струны составила порядка $J \sim 400\text{--}500$ А/см².

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Кратко представлены результаты работы источника высокозарядных ионов «Крион-6Т» в рамках четвертого сеанса ПНР-4 на инжекционном комплексе NICA: были получены и ускорены пучки ионов $^{40}\text{Ar}^{13+}$ и $^{124}\text{Xe}^{28+}$ и достигнута рекордная для нуклотрона интенсивность пучка ядер ксенона (свыше 10^7 ядер за цикл), ускоренных до энергии 3,9 ГэВ/нуклон.

По результатам ПНР-4 выработана дальнейшая стратегия повышения интенсивности ускоренных пучков тяжелых ионов в комплексе NICA. Так, в части, относящейся к работе ионного источника, предложено осуществить многократную инжекцию ионных пучков из источника в ЛУТИ-бустер с частотой 10 Гц. Ожидается, что в результате дальнейшего накопления и охлаждения этой серии ионных импульсов в бустере количество ядер, инжектируемых и ускоряемых далее в нуклотроне, должно возрасти на порядок.

Представлены результаты стендовых экспериментов на источнике «Крион-6Т» в режиме работы, соответствующей многократной инжекции ионных пучков в бустер. Показано, что ионный источник «Крион-6Т» может обеспечить многократную инжекцию 10–20 ионных импульсов с интервалом 100 мс без потери интенсивности и качества выведенного пучка в каждом из серии ионных импульсов (в сравнении с одиночным выведенным импульсом).

Представлены первые результаты по получению пучков высокозарядных ионов висмута. Описан апробированный способ инжекции висмута в ионный источник «Крион-6Т». Предварительные стендовые результаты по получению ионов висмута дают основания ожидать на выходе источника «Крион-6Т» порядка $\sim 2 \cdot 10^8$ ионов Bi^{37+} в импульсе как в режиме одиночных импульсов, так и в каждом импульсе в режиме многократной инжекции.

Благодарности. Авторы выражают искреннюю благодарность А. В. Бутенко и И. Н. Мешкову за постоянный интерес и внимание к работе, а также В. А. Лебедеву, В. А. Мончинскому, К. А. Левтерову и Б. В. Головенскому за многочисленные полезные обсуждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Boytsov A. Yu., Donets D. E., Donets E. D., Donets E. E., Katagiri K., Noda K., Ponkin D. O., Ramzdorf A. Yu., Salnikov V. V., Shutov V. B.* Electron String Ion Sources for Carbon Ion Cancer Therapy Accelerators // *Rev. Sci. Instrum.* 2015. V. 86. P. 083308.
2. *Donets E. D.* Electron Beam Ion Sources in the Reflex Mode of Operation (Review and Progress Report) // *Rev. Sci. Instrum.* 2000. V. 71. P. 810–815.
3. *Donets D. E., Donets E. D., Donets E. E., Salnikov V. V., Shutov V. B., Syresin E. M., Becker R., Kleinod M., Zipfel B., Björkhage M., Lundquist A., Liljeby L., Rensfelt K.-G., Kultashev O. K.* Studies of the Electron String Mode of EBIS Operation // *AIP Conf. Proc.* 2001. V. 572. P. 103–118.
4. *Donets E. D., Donets D. E., Donets E. E., Salnikov V. V., Shutov V. B., Tumanova Yu. A., Vadeev V. P., Björkhage M., Lundquist A., Liljeby L., Rensfelt K.-G., Beebe E., Alessi J., Pikin A. I.* Status Report on Studies of EBIS in the String Mode of Operation // *Rev. Sci. Instrum.* 2002. V. 73. P. 679–681.

5. *Donets E. D., Donets D. E., Donets E. E., Salnikov V. V., Shutov V. B., Gudkov S. V., Tumanova Yu. A., Vadeev V. P.* Use of EBIS in the String Mode of Operation on the Nuclotron Facility in JINR // *Rev. Sci. Instrum.* 2004. V. 75. P. 1543–1545.
6. *Donets D. E., Donets E. D., Donets E. E., Salnikov V. V., Shutov V. B.* Production of Highly Charged Ion Beams Kr^{32+} , Xe^{44+} , Au^{54+} with Electron String Ion Source (ESIS) Krion-2 and Corresponding Basic and Applied Studies // *J. Instrum.* 2010. V. 5. P. C09001.
7. *Bosser J., Carli C., Chanel M., Hill C., Lombardi A., Maccaferri R., Maury S., Mohl D., Molinari G., Rossi S., Tanke E., Tranquille G., Vretenar M.* Experimental Investigation of Electron Cooling and Stacking of Lead Ions in a Low Energy Accumulation Ring. PS Division, CERN, CH-1211 Geneva 23, Switzerland // *Part. Accel.* 1999. V. 63. P. 171–210.

Получено 15 сентября 2023 г.