

Е. Е. Донец

«Крион» на нуклотроне в 55-м сеансе: получены и ускорены пучки высокозарядных ионов углерода, аргона и криптона

Электронно-струнный источник высокозарядных ионов «Крион-6Т», недавно созданный в Лаборатории физики высоких энергий ОИЯИ, является рабочим прототипом источника высокозарядных ионов для инжектора ускорительного комплекса проекта NICA. Будучи стендовым экспериментальным источником, «Крион-6Т» приближается по параметрам производимых пучков тяжелых высокозарядных ионов к требованиям, заложенным для инжектора комплекса NICA, а также успешно производит пучки высокозарядных ионов для нуклотрона. В то же время источники высокозарядных ионов типа «Крион-6Т» оказываются очень привлекательными в качестве источников ионов углерода для медицинских ускорителей (синхротронов и циклотронов), для получения пучков высокозаряд-

ных тяжелых ионов короткоживущих радиоактивных изотопов, а также для фундаментальных исследований по физике высокозарядных ионов.

Электронно-струнный источник высокозарядных ионов (Electron String Ion Source (ESIS) в англоязычной литературе) является относительно новой принципиальной модификацией электронно-лучевого ионного источника (Electron Beam Ion Source (EBIS)), в котором для ионизации используется многократно отраженный электронный пучок (вместо прямого однопролетного пучка электронов в EBIS); отметим, оба этих типа источников высокозарядных ионов — электронно-лучевой [1] и электронно-струнный [2] — были впервые предложены, разработаны и использованы в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Е. Е. Donets

Krion at the Nuclotron in Run#55: C⁶⁺, Ar¹⁶⁺ and Kr²⁶⁺ Highly Charged Ion Beams Are Produced and Accelerated

Krion-6T Electron String Ion Source (ESIS) now is an operational prototype of an intended ion source for the NICA injector which approaches to fit all NICA injector requirements. It simultaneously produces ions beams of highly charged heavy ions for existing operational injection complex of the Nuclotron. At the same time, ESIS-type source of highly charged ions seems to be very useful for other applications, e.g., for cancer therapy accelerators (both synchrotrons and novel cyclotrons), for charge breeding of short-lived radioactive isotopes, and for basic studies with highly charged ions.

Electron String Ion Source (ESIS) is a relatively novel development of Electron Beam Ion Source (EBIS) which works with multiply reflected electrons; both EBIS [1] and ESIS [2] were first proposed, elaborated and commissioned at the Laboratory of High Energies, JINR (now Veksler and Baldin Laboratory of High Energy Physics).

First ESIS Krion-2M was successfully used in a few Nuclotron runs during 2002–2010 and highly charged ion beams of Ar¹⁶⁺, Fe²⁴⁺ and Xe⁴²⁺ were produced and accelerated there [3]. However, in order to fit requirements for the NICA injector new stand ion source Krion-6T (magnetic field up to 6 T) was created recently.

Basic studies with new stand Krion-6T ESIS were conducted in two relatively different ways: 1) to meet requirements for the NICA injection complex; 2) to produce beams of highly charged ions for the existing Nuclotron injection complex.

According to the NICA project requirements, ion source should produce about $(1\div 2) \cdot 10^9$ ppp (particles per pulse) of Au³¹⁺ with an ion beam extraction time from ion source 8 μ s and with a repetition rate no less than 10 Hz. The chosen charge state for gold ions ¹⁹⁷Au³¹⁺ was inspired by several reasons, and new RFQ-LINAC injector for NICA (produced by BEVATECH, Germany) has been optimized

Первый электронно-струнный источник «Крион-2М» был успешно использован для ускорения на нуклотроне пучков высокозарядных ионов аргона Ar^{16+} , железа Fe^{24+} и ксенона Xe^{42+} в нескольких сеансах в 2002–2010 гг. [3]. Однако для проекта NICA потребовалось создание более совершенного источника, и соответствующий стендовый прототип «Крион-6Т» (магнитное поле до 6 Тл) был создан несколько лет назад.

Исследования по получению пучков высокозарядных ионов с новым стендовым источником «Крион-6Т» велись в последнее время по двум достаточно различным (с точки зрения параметров и режимов работы источника) направлениям: 1) получение пучков высокозарядных ионов, требуемых в перспективе для инжекционного комплекса проекта NICA; 2) получение пучков высокозарядных ионов для существующего инжектора нуклотрона.

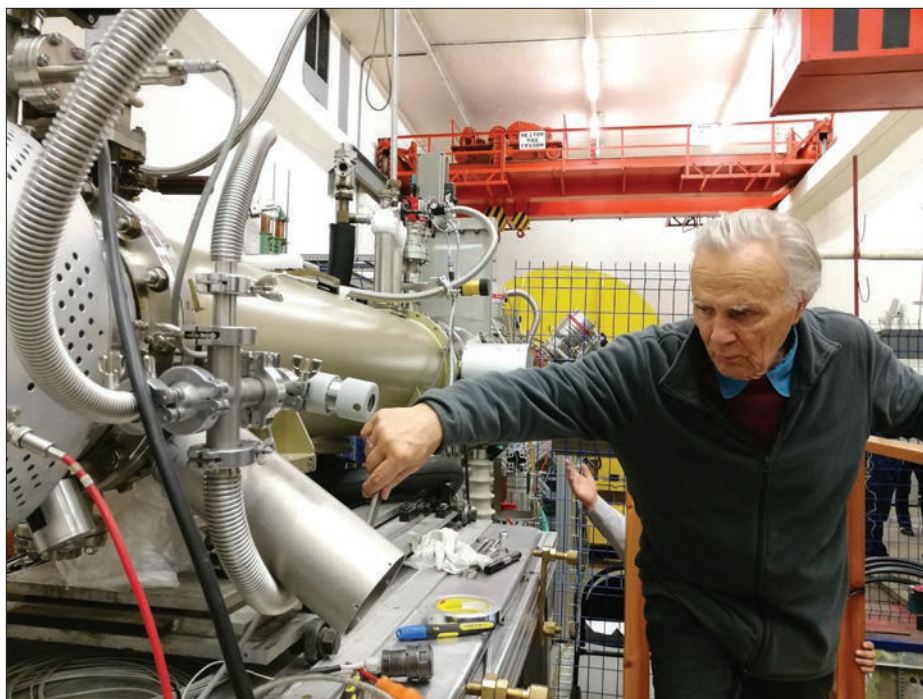
В соответствии с планируемыми параметрами ускорительного комплекса NICA ионный источник должен производить порядка $(1\div 2) \cdot 10^9$ ppp (частиц за импульс) ионов золота Au^{31+} , при этом время вывода ионного пучка из источника в каждом импульсе не должно превышать 8 мкс, а частота следования импульсов выведенных ионов из источника должна быть не менее 10 Гц. Выбранная зарядность пучка ионов золота $31+$ ($^{197}\text{Au}^{31+}$), производимого источником, была обусловлена несколькими причинами, прежде всего тем, что новый инжектор RFQ-LINAC для комплекса NICA (произведен компанией BEVATECH, Германия) как раз оптимизирован для ускорения ионов с отношением заряда к массе $Z/A \sim 1/6$. Стендовые исследова-

ния «Крион-6Т» к настоящему времени позволяют получить порядка $5,0 \cdot 10^8$ частиц в импульсе Au^{31+} с требуемым временем вывода ионного импульса из источника 8 мкс и с частотой следования ионных импульсов не менее 50 Гц. Последнее означает, что зарядность золота Au^{31+} получается из нейтрального золота в ионной ловушке источника «Крион-6Т» за время порядка 10 мс. Эти 10 мс включают в себя инжекцию нейтральных атомов золота в ионную ловушку и последующую ионизацию до указанного зарядового состояния Au^{31+} . Напомним, в электронно-лучевом и электронно-струнном ионных источниках ионизация производится электронным ударом, и соответствующая зарядность иона растет последовательно со временем ионизации, начиная с однозарядных состояний до нужной зарядности. 10 мс для получения зарядового состояния Au^{31+} — исключительно короткое время, которое соответствует эффективной плотности электронной струны (пучка) в области ионизации порядка $J_e \sim 1400 \text{ A/cm}^2$. Такое высокое значение является исключительно многообещающим фактором и открывает новые перспективы; однако необходимы новые, более детальные исследования этого феномена.

Для сравнения, типичная плотность электронного пучка в традиционном электронно-лучевом источнике высокозарядных ионов порядка $J_e \sim 300\div 500 \text{ A/cm}^2$ (Kriion-2 EBIS, BNL EBIS и др.). В электронно-лучевых ионных источниках плотность электронного пучка определяется в основном величиной магнитной компрессии электронного пучка и температурой эмиттера электронов и является величиной вполне предсказуемой, если электронно-ионно-опти-

Е. Д. Донец за настройкой источника высокозарядных ионов «Крион-6Т»

E. D. Donets adjusts the Krion-6T source of highly charged ions



ческая система источника выполнена прецизионно. В электронно-струнных источниках полученная эффективная плотность электронной струны является динамической величиной, получающейся самосогласованным образом как результат образования особого устойчивого состояния горячей замагниченной плазмы в особых условиях, зависящих от массы ионов, уровня компенсации ионами пространственного заряда электронов, энергии электронов, удерживающего магнитного поля источника и др.

Возвращаясь ко второй линии развития, по которой велись исследовательские работы с источником «Крион-6Т», заметим, что для существующего инжекционного комплекса нуклотрона источник должен производить ионы с отношением заряда к массе $Z/A \geq 1/3$, что определяется возможностями линейного ускорителя типа Альвареца ЛУ-20 (напомним, для сравнения, $Z/A \geq 1/6$ для нового инжектора комплекса NICA). Таким образом, для инжектора нуклотрона с линаком ЛУ-20 в основе требуются гораздо большие зарядности для соответствующих элементов, инжектируемых из источника пучков высокозарядных ионов. Получение в источнике ионов значительно более высоких зарядностей с $Z/A \geq 1/3$ означает в среднем более чем на порядок увеличение времени ионизации

(опять же в сравнении с такими же элементами, но с $Z/A \geq 1/6$), а это соответствует совершенно другим настройкам и режимам работы источника.

После серии стендовых исследований режимов получения высокозарядных ионов с $Z/A \geq 1/3$ источник «Крион-6Т» в начале октября 2017 г. был перевезен в здание инжектора ЛУ-20, смонтирован на высоковольтной платформе и состыкован с линией транспортировки пучка перед входом в RFQ инжектора нуклотрона. В начале ноября 2017 г. был начат пробный сеанс ускорения высокозарядных ионов на инжекционном комплексе нуклотрона. Технологическая авария на криогенном комплексе нуклотрона привела к переносу сеанса на 2018 г. В сложившейся обстановке было решено провести полноценный сеанс на инжекционном комплексе для оптимизации ускорения в инжекторе всех типов ионов, планирующихся для ускорения в 55-м сеансе нуклотрона. Таким образом, пучки высокозарядных ионов C^{6+} , Ar^{16+} и Kr^{26+} были получены в источнике «Крион-6Т» и ускорены на ЛУ-20. Зарядовый спектр пучков ускоренных ионов контролировался с помощью поворотных магнитов на выходе ЛУ-20, и это дало возможность настроить инжектор оптимальным образом для каждого типа требуемого ионного пучка.

for ions with charge to mass ratio $Z/A \sim 1/6$. Basic studies with Krion-6T allowed to get now up to $5.0 \cdot 10^8$ ppp of Au^{31+} with the required extraction time 8 μs and with a repetition rate about 50 Hz. The latter means that charge state Au^{31+} is produced during 10 ms in Krion-6T ion trap. Ionization is produced by electron impact sequential ionization starting with neutral Au. Note, this total time 10 ms includes neutral Au injection time and ionization time in an ion trap up to the desired mean charged state Au^{31+} . 10 ms to get Au^{31+} is an extremely short time that corresponds to an obtained efficient current density of the electron string (beam) in an ion trap about $J_e \sim 1400$ A/cm². This is a very promising value which opens new perspectives and should be studied in more details.

Note, typical current density of a conventional EBIS in a direct (one flight) electron beam mode of operation is about $J_e \sim 300 \div 500$ A/cm² (Krion-2 EBIS, BNL EBIS, etc.). It is necessary to emphasize that in ESIS-type ion source the obtained efficient electron current density is a dynamical value which is a result of self-consistent hot magnetized plasma steady state formation at some favorable conditions, including ion mass and ion-electron compensation level, electron energy, ion source magnetic field, etc.

On the other hand, in order to meet the requirements of the operational LU-20 Alvarez-type linac at the Nuclotron injection complex ion source should produce highly charged ions with charge to mass ratio more than $Z/A \geq 1/3$ (in comparison to $Z/A \geq 1/6$ for NICA injector). It means ion source should produce much more highly charged ions. Thus, the required charge states of heavy ions for LU-20 linac take one order of magnitude more sufficient ionization time in an ESIS that leads to substantial modifications of ESIS operation regime.

After preliminary experimental studies on stand at the beginning of October 2017, Krion-6T ESIS was transferred and mounted on a HV platform of RFQ-LU-20 linac of the Nuclotron injection complex. At the beginning of November 2017 Krion-6T ESIS was in operational conditions and test run with new RFQ-LU-20 linac injection complex has started. Because of liquid plan failure the Nuclotron run#55 has been postponed to February–March 2018. This gave a good opportunity to calmly conduct a test run on injection complex in order to optimize working parameters for each type of highly charged ions required for the Nuclotron run#55. During November–December 2017 and then during January–February 2018 ion beams of C^{6+} , Ar^{16+} , Kr^{26+} were produced by Krion-6T ESIS and

55-й сеанс нуклотрона начался 24 февраля 2018 г. с ускорения ядер углерода C^{6+} для эксперимента SRC (short range correlations). Источник «Крион-6Т» производил порядка $1 \cdot 10^9$ ядер углерода $^{12}C^{6+}$ ($Z/A = 0,5$) за импульс, при этом время ионизации до получения C^{6+} (95 %) составило около 70 мс, время вывода пучка из источника — 8 мкс. В качестве рабочего газа для получения ионов углерода использовался метан CH_4 .

Далее, после завершения работы на углероде, была сделана запланированная 72-часовая пауза для полного удаления остатков метана с трубок дрейфа криогенной ионной ловушки источника «Крион-6Т» перед переходом на другой тип ионов — аргон. В источнике «Крион-6Т» производилось порядка $5 \cdot 10^8$ ионов $^{40}Ar^{16+}$ ($Z/A = 0,4$) за импульс; время ионизации до достижения зарядового состояния $^{40}Ar^{16+}$ (70 % от общего числа ионов в пучке имели зарядность 16+) составило около 85 мс, время вывода из источника $^{40}Ar^{16+}$ — 8 мкс. Расчетная плотность электронной струны в этом режиме работы составила порядка $J_e \sim 350 \div 500$ А/см². Ускорение пучков аргона $^{40}Ar^{16+}$ на нуклотроне длилось 7 суток; основным потребителем ускоренного и выведенного пучка был эксперимент BM@N.

Ускорение пучков $^{78}Kr^{26+}$ на нуклотроне началось 29 марта и завершилось 5 апреля. В источнике

«Крион-6Т» производилось порядка $2 \cdot 10^8$ ионов $^{78}Kr^{26+}$ ($Z/A = 0,33$) в импульсе; время ионизации до достижения зарядового состояния $^{78}Kr^{26+}$ (80 % от общего числа ионов в импульсе) составило около 80 мс, время вывода ионов из источника в каждом импульсе по-прежнему было 8 мкс. Расчетная плотность электронной струны при получении ионов $^{78}Kr^{26+}$ оценивается в интервале $J_e \sim 400 \div 600$ А/см². Основным потребителем ускоренного и выведенного из нуклотрона ионного пучка $^{78}Kr^{26+}$ был эксперимент BM@N; также две ускорительные смены были проведены для экспериментов по космической радиобиологии и для работ по стохастическому охлаждению ионного пучка в нуклотроне. Отметим, что пучок высокозарядных ионов криптона был ускорен на нуклотроне впервые в его истории.

После успешного завершения ускорительной программы 55-го сеанса эксперименты на инжекционном комплексе нуклотрона с тяжелыми ионами были продолжены. В рамках подготовки к будущей тяжелоионной программе проекта NICA на нуклотроне были успешно ускорены пучки ксенона $^{124}Xe^{41+}$ ($Z/A = 0,33$). В источнике «Крион-6Т» производилось порядка $(1 \div 2) \cdot 10^8$ ионов $^{124}Xe^{41+}$ за импульс; время

further accelerated by RFQ-LU-20 linac. Charge state of the accelerated ions was detected by bending magnets installed after LU-20 linac.

The Nuclotron run#55 started on 24 February 2018. First C^{6+} ($Z/A = 0.5$) ion beam was produced in Krion-6T and accelerated in RFQ-LU-20 — Nuclotron for SRC (short range correlations) experiment. Krion-6T produced $1 \cdot 10^9$ ppp of $^{12}C^{6+}$; ionization time up to C^{6+} charge state (95%) was about 70 ms, extraction time from ion source was 8 μ s. Run with C^{6+} ion beam has lasted for 2 weeks of non-stop (with 2 h each day technological break, caused by cryogenics) operation.

Then after 72 h of planned technological break, $^{40}Ar^{16+}$ ($Z/A = 0.4$) ion beam was produced in Krion-6T and further accelerated in RFQ-LU-20 – Nuclotron. Krion-6T produced $5 \cdot 10^8$ ppp of $^{40}Ar^{16+}$; ionization time up to $^{40}Ar^{16+}$ charge state (70%) was about 85 ms, extraction time from ion source was 8 μ s. The estimated electron current density was about $J_e \sim 350 \div 500$ А/cm². Experiments with an accelerated and extracted to users Ar¹⁶⁺ ion beam lasted for 7 days; the main user was BM@N experiment.

Last kind of ions in the Nuclotron run#55 was $^{78}Kr^{26+}$ ($Z/A = 0.33$). Acceleration of $^{78}Kr^{26+}$ ion beam on the Nuclotron started on 29 March and finished on 5 April

2018. Krion-6T produced $2 \cdot 10^8$ ppp of $^{78}Kr^{26+}$; ionization time up to $^{78}Kr^{26+}$ charge state (80%) was about 80 ms, extraction time from ion source was 8 μ s. The estimated electron current density was about $J_e \sim 400 \div 600$ А/cm². The main user of the accelerated and extracted $^{78}Kr^{26+}$ ion beam was BM@N experiment; also basic studies in space radiobiology and experiments with stochastic cooling have been done with the use of accelerated $^{78}Kr^{26+}$ ion beam. Note, krypton ion beam was first accelerated on the Nuclotron.

After completion of the Nuclotron run#55, test run on injection complex continued till the last decade of April 2018. Towards future heavy ion program on the NICA complex $^{124}Xe^{41+}$ ($Z/A = 0.33$) ion beam was produced on Krion-6T ESIS and accelerated on RFQ-LU-20. Krion-6T produced $(1 \div 2) \cdot 10^8$ ppp of $^{124}Xe^{41+}$; ionization time up to $^{124}Xe^{41+}$ charge state (40%) was about 130 ms, extraction time from ion source was 8 μ s. Note, the estimated electron current density in these experiments with $^{124}Xe^{41+}$ production is equal to $J_e \sim 900 \div 1000$ А/cm².

Krion-6T ESIS was transferred back on stand from HV platform of LU-20 linac at the end of May 2018, and first new test experiments to meet requirements for the NICA injector started at the end of June 2018.

ионизации до среднего зарядового состояния $^{124}\text{Xe}^{41+}$ (40% ионов в импульсе имели данную зарядность) составило около 130 мс, время вывода ионного пучка из источника — 8 мкс. Расчетная плотность электронной струны в этих экспериментах оценивается в диапазоне $J_e \sim 900 \div 1000 \text{ А/см}^2$.

После завершения тяжелоионной программы на инжекторе ЛУ-20 источник «Крион-6Т» был разобран, перемещен обратно и вновь собран на экспериментальном стенде в конце мая 2018 г., а в конце июня начались первые стендовые тестовые эксперименты на источнике.

Стоит отметить, что в течение последних лет в секторе источников высокозарядных ионов ЛФВЭ проводятся также фундаментальные и прикладные исследования по целому ряду направлений. Среди них исследования по физике и технологии получения высокозарядных ионов, по взаимодействию высокозарядных ионов с поверхностью, по рентгеновской спектроскопии характеристического излучения высокозарядных ионов, а также по ядерной физике низких энергий с высокозарядными ионами.

Отдельно стоит упомянуть совместные работы с Национальным институтом радиологических исследо-

ваний (Чиба, Япония). В серии недавних экспериментальных работ с источником «Крион-6Т» было показано [4], что электронно-струнные ионные источники могут оказаться исключительно эффективными для получения пучков ионов углерода C^{4+} и C^{6+} для медицинских ускорителей, использующихся в адронной терапии онкозаболеваний. В частности, было показано, что на стендовом источнике «Крион-6Т» можно получить порядка 10^{10} ионов C^{4+} за импульс и порядка $5 \cdot 10^9$ ионов C^{6+} за импульс, что делает такие источники оптимальными для использования в медицинских синхротронах [4]. Также было показано, что на источнике «Крион-6Т» в особом режиме работы можно получать более 10^{11} ионов C^{6+} в секунду с частотой следования выведенных из источника импульсов ионов 100 Гц, и эта частота может быть увеличена в несколько раз без потери общего числа выводимых ионов за секунду и за импульс. Этот факт делает электронно-струнные ионные источники также максимально эффективными для использования в быстроциклирующих медицинских циклотронах нового типа (Cyclinac), см. [4] и список литературы там же.

Список литературы / References

1. *Donets E. D.* // IEEE Trans. on Nucl. Sci. NS. 1976. V.23. P.897;
Donets E. D. // Physica Scripta. 1983. V.T3. P.11–18.
2. *Donets E. D., Donets D. E., Donets E. E.* Russian Patent Request 94019797, May 27, 1994 // Bul. Izobretenia. M., 1996. No.27;
Donets E. D. // Physica Scripta. 1997. V.T71. P.5–8.
3. *Donets D. E., Donets E. D., Donets E. E., Salnikov V. V., Shutov V. B.* // JINST. 2010. V.5. P.C09001.
4. *Boytsov A. Yu., Donets D. E., Donets E. D., Donets E. E., Katagiri K., Noda K. et al.* // Rev. Sci. Instr. 2015. V.86. P.083308.

One should note other basic and applied studies with heavy highly charged ions, produced with Krion-6T ESIS which have been done during recent years. Among them there are basic studies on interactions of highly charged ions with surfaces, X-ray characteristic spectrometry from HCI, and nuclear physics with use of bare nuclei and highly charged ions.

Also, one should emphasize basic and applied studies which are in progress in collaboration with the National Institute for Radiological Science (Chiba, Japan). It was experimentally shown that the type of the Electron String Ion Sources (ESIS) is considered to be the appropriate one to produce pulsed C^{4+} and C^{6+} ion beams for cancer therapy accelerators. It was shown that the new test ESIS Krion-6T already now provides on stand more than 10^{10} C^{4+} ppp (ions per pulse) and about $5 \cdot 10^9$ C^{6+} ions per pulse, that could be suitable to apply at medical synchrotrons [4]. It has also been found that Krion-6T can provide more than 10^{11} C^{6+} ions per second at 100 Hz repetition rate, and the repetition rate can be increased at the same or larger ion output per second. This makes ESIS applicable at cyclotrons as well, especially taking into account current EU CYCLINAC projects — new fast-cycling accelerators for hadrontherapy, for more details see [4] and references therein.