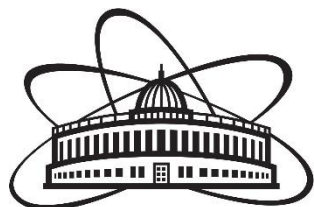


**ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

**ЛАБОРАТОРИЯ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ**

**ИМ. В. И. ВЕКслера и А. М. БАЛДИНА**



*На правах рукописи*

A handwritten signature in blue ink is located on the right side of the page, below the text 'На правах рукописи'. The signature is written in a cursive style and is positioned above a horizontal line.

**ПОНКИН**

**Дмитрий Олегович**

**СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ДИАГНОСТИКИ ПУЧКОВ ДЛЯ  
ИСТОЧНИКОВ ВЫСОКОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ «КРИОН»**

Специальность 1.3.18 –

«Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника»

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации**

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Дубна – 2024

Работа выполнена в  
Лаборатории физики высоких энергий им. В.И. Векслера и А.М. Балдина  
Объединенного института ядерных исследований

- Научный руководитель: **Донец Евгений Евгеньевич**  
кандидат физико-математических наук  
Начальник сектора № 3  
Электронно-лучевого источника ионов  
Научно-экспериментального отдела  
инжекции и кольца Нуклотрона ЛФВЭ ОИЯИ
- Соруководитель: **Горбунов Николай Васильевич**  
кандидат технических наук  
Начальник сектора № 2 Торцевых детекторов на CMS  
Научно-экспериментального отдела физики  
на CMS ЛФВЭ ОИЯИ
- Официальные оппоненты: **Таскаев Сергей Юрьевич**  
доктор физико-математических наук  
Главный научный сотрудник  
ИЯФ СО РАН имени Г.И. Будкера  
**Подорожный Дмитрий Михайлович**  
кандидат физико-математических наук  
Заведующий лабораторией  
галактических космических лучей  
НИИЯФ МГУ имени Д.В. Скобельцына

С электронной версией диссертации можно ознакомиться на официальном сайте  
Объединенного института ядерных исследований в информационно-  
телекоммуникационной сети «Интернет» по адресу: <http://dissertations.jinr.ru>.

С печатной версией диссертации можно ознакомиться в Научно-технической  
библиотеке ОИЯИ (г. Дубна, Московская область, ул. Жолио-Кюри, д. 6).

Ученый секретарь диссертационного совета  
кандидат физико-математических наук

**В. А. Арефьев**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность

Получение интенсивных пучков высокозарядных тяжелых ионов – одна из основных задач ускорительного комплекса NICA/MPD [1 – 3] в Лаборатории физики высоких энергий (ЛФВЭ) Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ).

Ключевыми элементами инжектора тяжелых ионов комплекса NICA [4] являются криогенные электронно-струнные источники (ЭСИ) высокозарядных тяжелых ионов «КРИОН» [5]. Они стали развитием криогенных электронно-лучевых источников ионов (ЭЛИ) [6 – 8], разработанных на основе электронно-лучевого метода глубокой ионизации атомов, предложенного Е. Д. Донцом в 1967 г. [9].

Как прототип основного источника тяжелых ионов инжектора NICA создан электронно-струнный источник высокозарядных тяжелых ионов КРИОН-6Т, производивший пучки высокозарядных ионов  $^{12}\text{C}^{6+}$ ,  $^{40}\text{Ar}^{16/13+}$ ,  $^{124}\text{Xe}^{28+}$  и  $^{78}\text{Kr}^{26+}$ , ускоренные до энергии  $\sim 4$  ГэВ/н в сеансах комплекса NICA. **Результаты его работы представлены нами в статьях [А1 – А3].**

Существовавшая в ЛФВЭ ОИЯИ система управления электронно-струнными источниками ионов обладала недостатками, ограничившими ее использование для создаваемого источника ионов КРИОН-6Т.

Модули формирования потенциальных барьеров не задавали достаточные амплитуды для движения ионов в ионной ловушке при провалах потенциала от накопленного электронного заряда внутри ловушки в магнитном поле сверхпроводящего соленоида 6 Тесла.

Дискретность шагов установки напряжения в цепи накала эмиттера электронной пушки (ЭП)  $N_{\text{шн}} = 2^8$  не обеспечивала точную подстройку эмиссии электронов. При нелинейной эмиссии электронов в «отражательном» режиме работы источника ионов [10] требовалось уменьшить шаг накала, обеспечить измерения тока и напряжения в цепи накала эмиттера.

Известные решения, разработанные на основе промышленных комплексов автоматизации [11 – 15] обладали другими недостатками: масс-габаритные характеристики затрудняли их размещение на высоковольтном потенциале; сложность изменения ключевых характеристик и функционала в условиях научно-исследовательских и экспериментальных работ усложняла и часто делала невозможным их проведение.

Представленные недостатки показали необходимость совершенствования систем управления и диагностики пучков электронно-струнных источников ионов КРИОН для обеспечения работы инжектора тяжелых ионов комплекса NICA, что является важной и актуальной работой.

**Цель работы** – разработка и внедрение методик, средств управления и диагностики пучков электронно-струнных источников высокозарядных тяжелых ионов КРИОН для обеспечения работы инжектора тяжелых ионов ускорительного комплекса NICA в ЛФВЭ ОИЯИ.

### **Задачи**

1. Создать систему управления импульсной инжекцией электронов в ионную ловушку из электронной пушки, катод которой находится на отрицательном высоковольтном потенциале до  $-10$  кВ. Обеспечить измерение тока в цепи эмиттера и потенциала управления инжекцией электронов;
2. создать систему управления электростатической ионной ловушкой в полях до 6 Тесла для контроля инжекции, удержания, экстракции ионов с возможностью установления амплитуд потенциальных барьеров и импульса экстракции ионов до  $+3,5$  кВ;
3. создать систему диагностики импульсных ионных и электронных пучков низких энергий обеспечивающую: измерения поперечных профилей ионных пучков, измерения положения, размера и тока ионных и электронных пучков.

## Научная новизна

1. Разработана и внедрена методика управления импульсной инжекцией электронов в ионную ловушку электронно-струнных источников ионов КРИОН из электронной пушки с катодом, находящимся на отрицательном высоковольтном потенциале до  $-10$  кВ.

В основе методики управления стоит передача на высоковольтный потенциал катодного узла отдельных сигналов синхронизации и команд управления по единому оптическому каналу. Сигналы синхронизации и команды управления преобразуются в последовательность данных с дальнейшим их восстановлением в исходные отдельные сигналы на высоковольтном потенциале катодного узла электронной пушки.

2. Разработана и внедрена методика формирования потенциальных барьеров электростатической ионной ловушки в магнитных полях до 6 Тесла, задающая аксиальное движение ионов и цикл работы электронно-струнных источников ионов КРИОН.

Суть методики – управление созданными импульсными высоковольтными источниками положительных напряжений с амплитудами до  $+3,5$  кВ, конструктивно объединенными в единую систему управления, обеспечивающую стабильность ионной ловушки при провалах потенциала от накопленного электронного заряда в магнитных полях до 6 Тесла.

## Практическая значимость

1. Создана система управления электронно-струнным источником высокозарядных тяжелых ионов КРИОН-6Т, впервые обеспечившая получение ионов  $^{12}\text{C}^{6+}$ ,  $^{40}\text{Ar}^{16/13+}$ ,  $^{124}\text{Xe}^{28+}$  и  $^{78}\text{Kr}^{26+}$  в ускорительных сеансах инжектора тяжелых ионов NICA.

Система поддерживает:

- управление импульсной инжекцией электронного пучка в ионную ловушку с количеством дискретных шагов установки напряжения в цепи накала эмиттера  $N_{\text{шн}} = 2^{16}$ , измерение тока в цепи эмиттера с точностью не хуже  $\pm 5\%$ , измерение установленного напряжения накала и напряжения управления инжекцией электронов точностью не хуже  $\pm 0,3\%$ ;
- управление электростатической ионной ловушкой с возможностью установления амплитуд потенциальных барьеров  $U_{\text{пб}}$  до  $+3,5 \text{ кВ} \pm 1\%$  и импульса экстракции ионов  $U_{\text{ив}}$  до  $+3,5 \text{ кВ} \pm 1\%$  для устойчивой работы ионной ловушки в магнитных полях до 6 Тесла.

2. Создана система диагностики импульсных электронных и ионных пучков с энергиями до 5 МэВ/н, обеспечивающая измерение их размера, формы и полного тока (или суммарного заряда) с точностью не хуже  $\pm 0,5\%$ ;

с ее помощью впервые на ускорительном комплексе NICA измерены поперечные профили пучков ионов  $^{12}\text{C}^{6+}$ ,  $^{40}\text{Ar}^{16/13+}$ ,  $^{124}\text{Xe}^{28+}$  и  $^{78}\text{Kr}^{26+}$  с энергией 3,2 МэВ/н в канале транспортировки пучка из линейного ускорителя тяжелых ионов (ЛУТИ) в бустерный синхротрон (Бустер);

измерения поперечных профилей пучков ионов обеспечили настройку ионно-оптической структуры канала транспортировки ЛУТИ/Бустер для их инжекции в Бустер во время ускорительных сеансов комплекса NICA.

## Положения, выносимые на защиту

1. Методика управления импульсной инжекцией электронов в электростатическую ионную ловушку из электронной пушки с катодом, находящимся на отрицательном высоковольтном потенциале. Использование методики обеспечивает формирование протяженного аксиально-симметричного электронного пучка в электронно-струнных источниках ионов КРИОН;
2. Методика формирования потенциальных барьеров электростатической ионной ловушки с амплитудами барьеров до +3,5 кВ, обеспечивающая ее работу в магнитных полях до 6 Тесла. Использование методики позволяет управлять аксиальным движением и экстракцией ионов в электронно-струнных источниках ионов КРИОН;
3. Система диагностики пучков электронно-струнных источников ионов КРИОН, позволившая впервые на комплексе NICA измерить поперечные профили пучков ионов  $^{12}\text{C}^{6+}$ ,  $^{40}\text{Ar}^{16/13+}$ ,  $^{124}\text{Xe}^{28+}$  и  $^{78}\text{Kr}^{26+}$  в канале транспортировки пучков ЛУТИ/Бустер;
4. Результаты работы системы управления, впервые обеспечившей получение ионов  $^{12}\text{C}^{6+}$ ,  $^{40}\text{Ar}^{16/13+}$ ,  $^{124}\text{Xe}^{28+}$  и  $^{78}\text{Kr}^{26+}$  на электронно-струнном источнике ионов КРИОН-6Т в составе инжектора тяжелых ионов комплекса NICA.

### Личный вклад автора

Методические, схемотехнические, аппаратурные и программные решения, составившие основу систем управления и диагностики пучков для электронно-струнного источника высокозарядных тяжелых ионов КРИОН-6Т разработаны и созданы либо автором лично, либо с его определяющим вкладом.

Программное обеспечение визуализации поперечных профилей пучка ионов в канале транспортировки ЛУТИ/Бустер NICA создано при непосредственном определяющем участии автора.

## Апробация работы

Результаты работ представлены на следующих конференциях:

- Nuclear Electronics and Computing (**NEC**) в 2013, 2015 и 2017 гг.;
- International Scientific Conference of Young Scientists and Specialists (**AYSS**) в 2017, 2018, 2019, 2020, 2022 и 2023 гг.
- VI конференции молодых ученых и специалистов «**Алушта-2017**»;
- International Conference on Modern Problems of Nuclear Physics (**MPNP**) в 2019;
- Международные совещания «Ускорительный комплекс NICA: проблемы и решения» в 2016, 2018 и 2023 гг.;
- International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (**EDM**) в 2024 г.

## Достоверность результатов

Достоверность полученных результатов подтверждается итогами работы электронно-струнного источника ионов КРИОН-6Т в составе инжектора тяжелых ионов комплекса NICA, где полученные на источнике ионы  $^{40}\text{Ar}^{16/13+}$ ,  $^{78}\text{Kr}^{26+}$  и  $^{124}\text{Xe}^{28+}$  ускорены до энергии 3,2 МэВ/н.

## Публикации

Работы, составившие основы диссертации, опубликованы в **13** статьях, **6** из которых изданы в рецензируемых журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации.

## Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, **4** глав, заключения, списка литературы из 53 наименований и 2 приложений. Текст диссертации содержит 98 рисунков и 18 таблиц. Общий объем работы, включая приложения, составляет 151 страницу.



## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность работы, формулируются цель и задачи, отмечается научная новизна. Приводятся положения, вынесенные на защиту и раскрывается практическая ценность полученных результатов.

Основное содержание работы изложено в четырех главах.

В первой главе приводится краткий исторический обзор и литературный анализ систем управления и диагностики пучков электронно-лучевых источников ионов, отмечаются их особенности, достоинства и недостатки.

Проведенный литературный анализ подтверждает актуальность и целесообразность развития методик и аппаратуры, обеспечивающих управление и диагностику пучков электронно-струнных/лучевых источников ионов КРИОН.

Анализ показывает обоснованность решений, составивших основы разработок, представленных в настоящей диссертации. На Рисунке 1 показана структурная схема источника ионов КРИОН-6Т показывающая связь его элементов с частями созданных систем управления и диагностики пучков [A4].



Рисунок 1. Структурная схема источника ионов КРИОН-6Т:

- 1) катод, 2) фальшкатод, 3) анод электронной пушки, 4) сверхпроводящий соленоид,
- 5) структура дрейфа, 6) анод отражателя электронов, 7) отражатель электронов,
- 8) многопроволочный профилометр, 9) секционированный коллектор пучка.

Во второй главе описывается система управления импульсной инжекцией электронов в электростатическую ионную ловушку источников ионов КРИОН. Работы автора [A4], [A5] и [B1] по данной теме показывают основные решения и результаты их внедрения.

Зарядовое состояние иона, в электронно-струнных источниках ионов, определяется фактором ионизации равного произведению величины плотности потока электронов  $J$ , бомбардирующем ионы, на время бомбардировки  $T_i$  [9].

Плотность потока электронов обеспечивается созданием в продольном объеме ионной ловушки интенсивного протяженного электронного пучка заданной энергии, сжимаемого соленоидальным магнитным полем.

Электронный пучок формируется в катоде электронной пушки с IrCe эмиттером [16] (Рисунок 2А) и инжектируется в ионную ловушку, где сжимается в области максимального магнитного поля, обеспечивая необходимую электронную плотность. ЭП электронно-струнных источников ионов КРИОН расположена на краю оси соленоидального магнитного поля в области  $1/20 B_{max}$  и имеет в своем составе элементы согласно схеме, представленной на Рисунке 2.

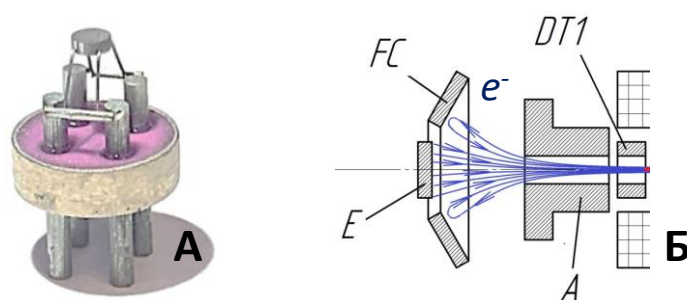


Рисунок 2. А) Вид IrCe эмиттера; Б) Схема электронной пушки источника ионов КРИОН-6Т:

$E$  – эмиттер,  $FC$  – фальшкатод,  $A$  – анод,  $DT1$  – начальный элемент структуры дрейфа.

Работу катодного узла электронной пушки обеспечивают система управления инжекцией электронов, находящаяся на отрицательном высоковольтном потенциале катода  $U_{эп}$ . Задача модулей управления инжекцией электронов – нагрев эмиттера плавной подачей тока, управление импульсной инжекцией электронов в ионную ловушку.

Из-за разницы потенциалов между «землей» и высоковольтным потенциалом  $U_{\text{эп}}$ , достигающим амплитуды до  $-10$  кВ, связь с модулями управления обеспечивается через оптический канал.

Внедренная методика управления инжекцией реализует передачу по единому оптическому каналу сигналов синхронизации, данных и команд управления в модули электроники катодного узла на высоковольтном потенциале  $U_{\text{эп}}$ .

На Рисунке 3 представлена структурная схема разработанной системы управления инжекцией электронов для источников ионов КРИОН объясняющая суть методики управления.



Рисунок 3. Структурная схема системы управления инжекцией электронов источников ионов КРИОН.

Принципы работы и особенности модулей, составляющих основу представленной схемы кратко описаны в работах автора [A4], [A5] и [B1], более подробное их описание приводится во второй главе настоящей диссертации.

Созданная система управления импульсной инжекцией электронов в ионную ловушку обеспечила получение электронного пучка энергией 6 кэВ с током эмиссии до 30 мА и его инжекцию в ионную ловушку электронно-струнных источников тяжелых ионов КРИОН (Рисунок 4).

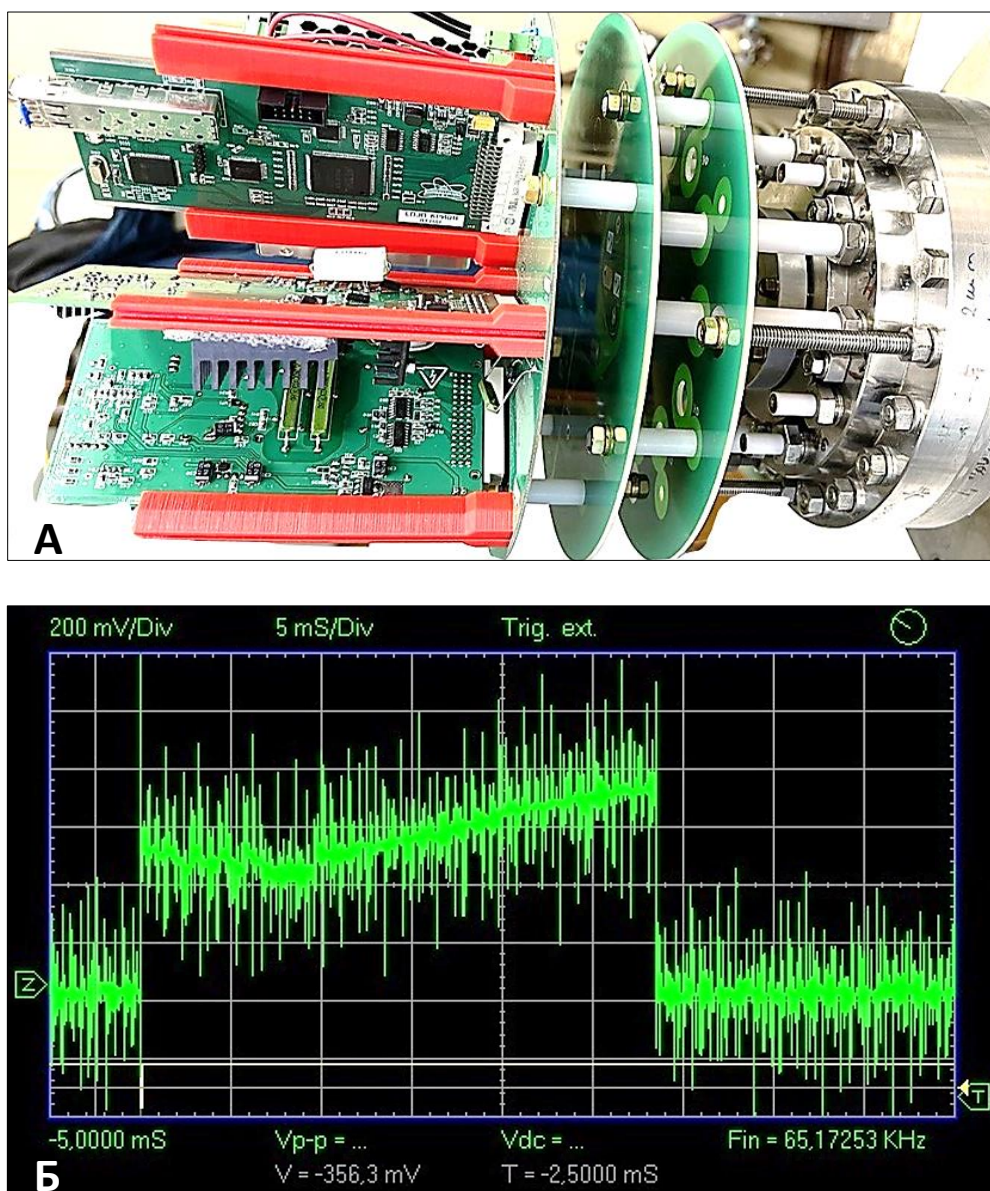


Рисунок 4. А) Вид системы управления инжекцией электронов источников ионов КРИОН; Б) измеренный импульс электронного тока: амплитуды 5 – 7 мА, длительность – 30 мс.

Третья глава посвящена описанию системы управления электростатической ионной ловушкой. Она задает аксиальное движение ионов и цикл работы электронно-струнных источников ионов. В статьях автора [A4], [A6] и [B2] по данной теме показаны основные решения и результаты их внедрения.

Цикл работы импульсных источников ионов КРИОН задается следующими последовательными процессами (Рисунок 5):

1. исходное состояние (готовность источника, ожидание запуска);
2. создание протяженного электронного пучка вдоль ионной ловушки;
3. инжекция рабочего вещества в область ионизации;
4. ионизация;
5. экстракция (вывод) ионов и возврат в исходное состояние.

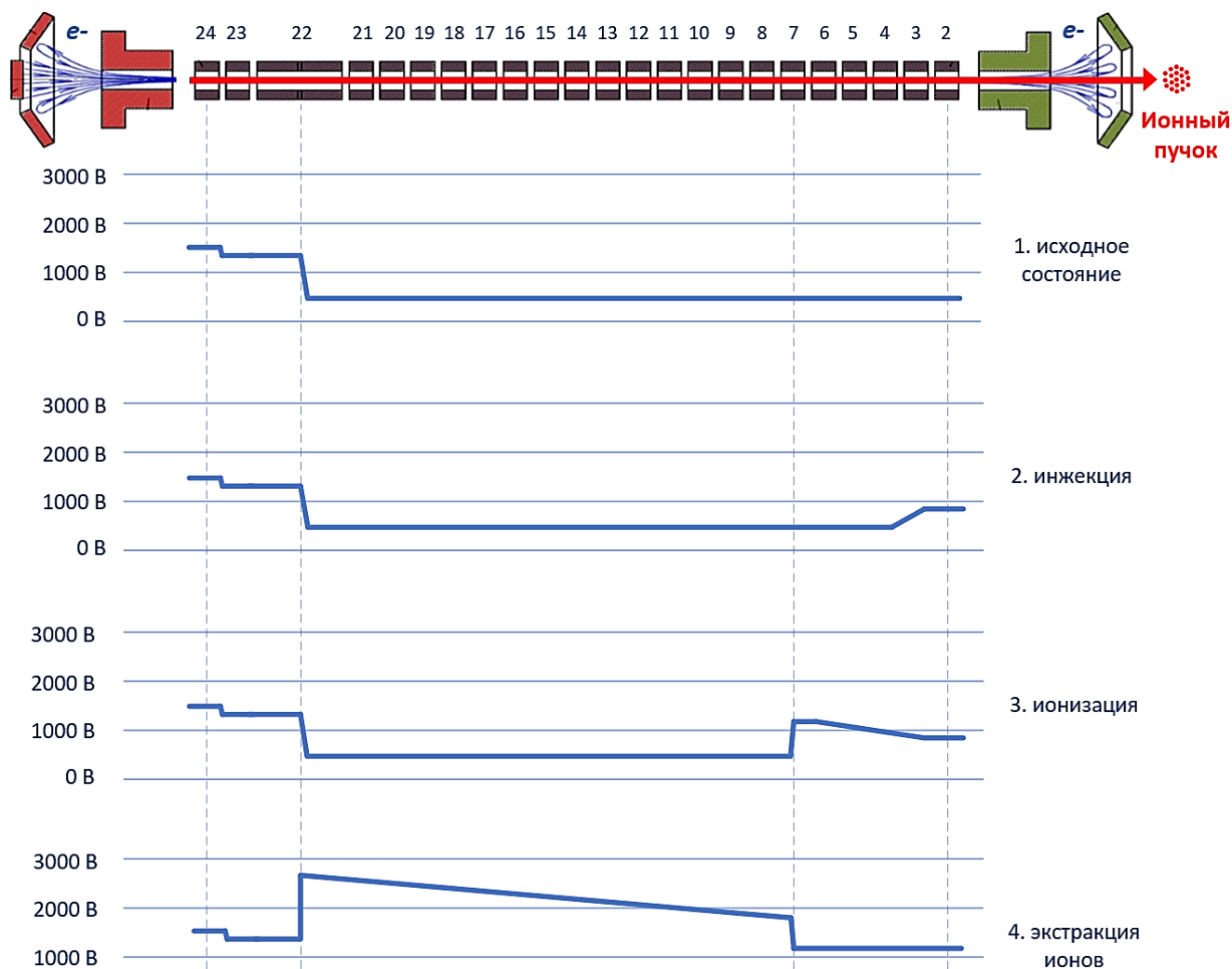


Рисунок 5. Типовые распределения потенциалов ионной ловушки ЭСИ КРИОН.

**Время ионизации  $T_i$  задающее фактор ионизации  $J \cdot T_i$**  в источниках ионов КРИОН определяется временем бомбардировки ионов электронами продольного электронного пучка с **плотностью потока электронов  $J$** .

В радиальном направлении низкозарядные ионы, попавшие в ловушку после инжекции, удерживаются внутри электронного пучка его отрицательным пространственным зарядом. В продольном направлении удержание и управление движением ионов осуществляется подачей положительных потенциалов на секции (электроды) структуры дрейфа, имеющие температуру жидкого гелия и расположенные вдоль всей длины ионной ловушки [9].

**Управление электростатической ионной ловушкой сводится к своевременной подаче высоковольтных импульсов на определенные секции структуры дрейфа.**

Источниками указанных высоковольтных импульсов являются программируемые импульсные высоковольтные источники положительных напряжений «Блоки Формирования Потенциальных Барьеров» (БФПБ), являющиеся основой **системы управления ионной ловушкой**. К выходам БФПБ подключаются резистивные делители напряжений, задающие необходимые градиенты потенциалов, подаваемые на секции структуры дрейфа за счет гальванической связи с ними. Структура дрейфа и модули системы управления ионной ловушкой находится на положительном высоковольтном потенциале  $U_{стр}$ .

Из-за разницы потенциалов между «землей» и высоковольтным потенциалом  $U_{стр}$ , достигающим в разных режимах работы источника величины до 3 кВ, связь с модулями управления ионной ловушкой происходит через оптический канал.

Ключевой задачей в рамках развития системы управления ловушкой стала переработка БФПБ для задания амплитуд барьеров  $U_{пб}$  до +3,5 кВ с целью обеспечения стабильной работы ловушки в магнитных полях до 6 Тесла. Кроме того, создан модуль формирования импульса экстракции ионов «Блок вывода» (БВ) с амплитудой импульса экстракции ионов из источника  $U_{ив}$  до +3,5 кВ. Предложенная и реализованная схема управления ионной ловушкой электронно-струнных

источников ионов показанная на Рисунке 6 содержит три БФПБ, БВ, «Блок формирования высокого напряжения» (БФВН), оптический приемопередатчик и изолированный источник питания для возможности поднятия положительного высоковольтного потенциала на общей точке  $U_{стр}$ . БФПБ и БВ объединены в единую модульную систему управления, размещенную в крейте, расположенном на положительном высоковольтном потенциале  $U_{стр}$ .

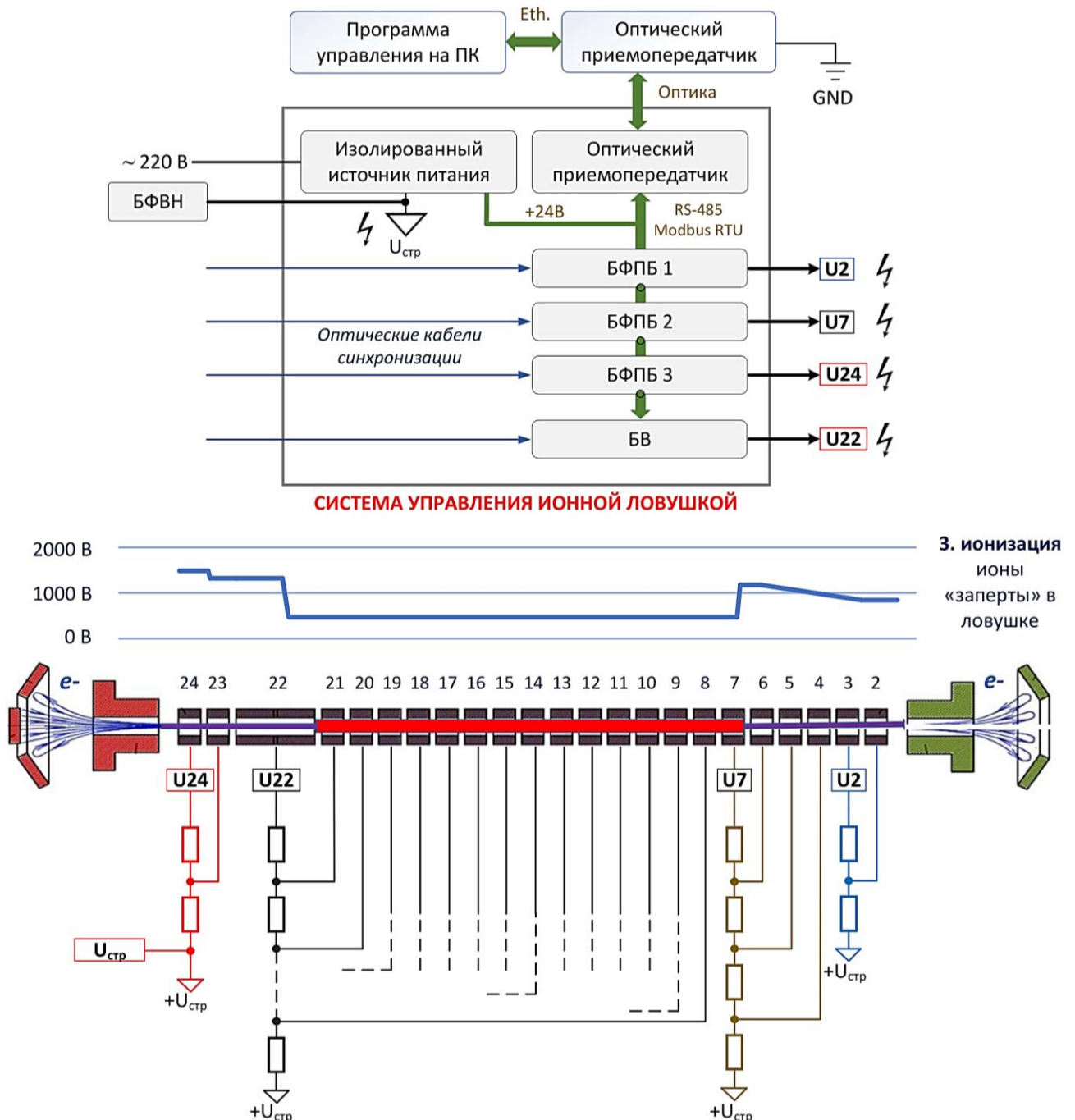


Рисунок 6. Структурная схема управления электростатической ионной ловушкой источников ионов КРИОН.

На Рисунке 7 показана осциллограмма выходного напряжения БФПБ, на Рисунке 8 выходного напряжения БВ.

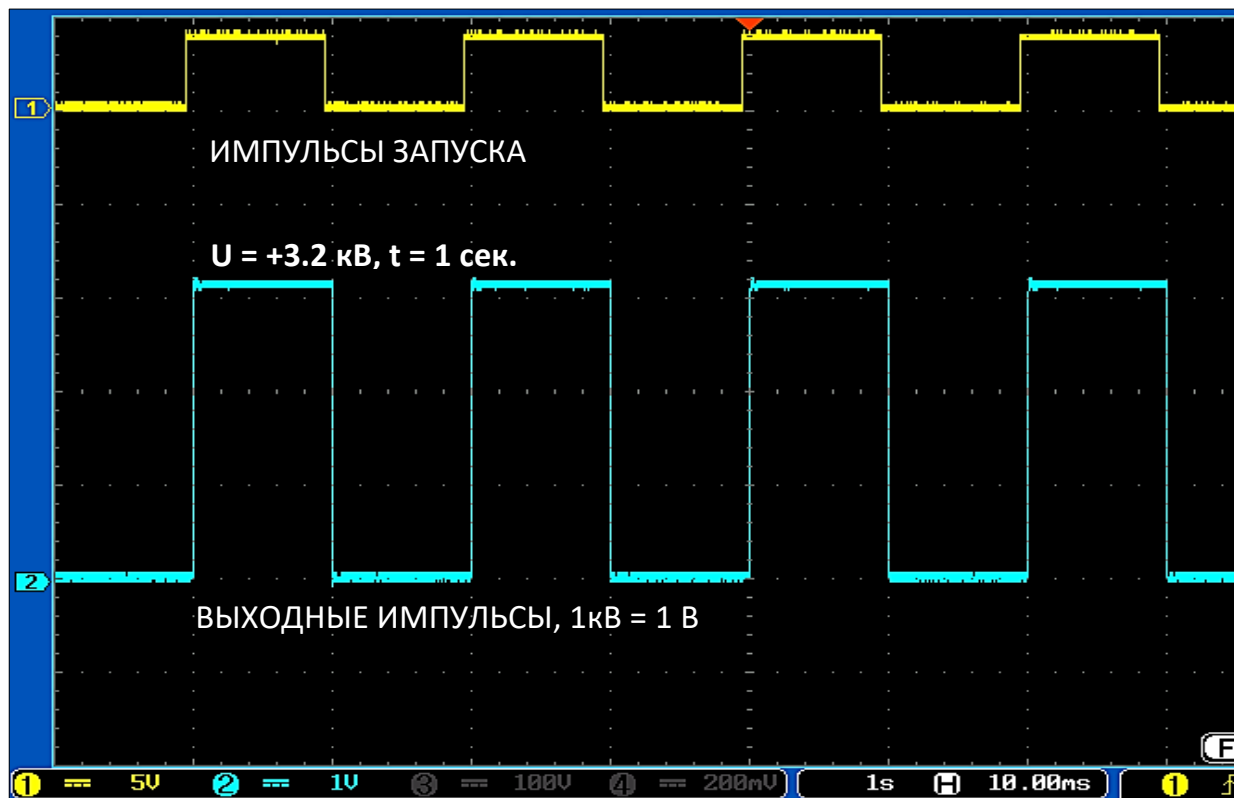


Рисунок 7. Типовая осциллограмма напряжений БФПБ.

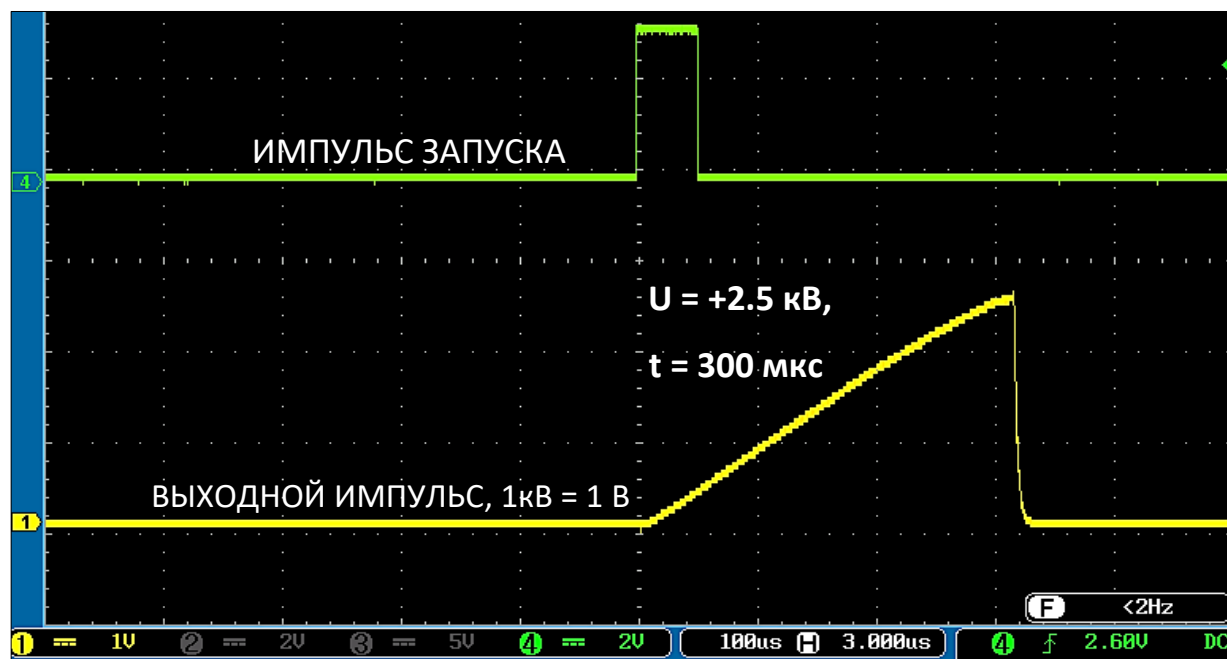


Рисунок 8. Типовая осциллограмма напряжений БВ  
в режиме медленной экстракции ионов.



Для передачи команд управления с компьютера используется пара разработанных оптических трансиверов Eth/Opt и УК 1. Крейт электроники управления ловушкой показан на Рисунке 9.



Рисунок 9. Разработанные и созданные автором электронные модули системы управления ионной ловушкой ЭСИ КРИОН-6Т:

- 1) модуль питания УБП 243; 2) БФВН; 3) накопительная емкость модулятора БВ;
- 4) оптический трансивер Eth/Opt; 5) группа БФПБ; 6) модулятор БВ;
- 7) резистивный делитель напряжений; 8) оптический трансивер УК 1.

Управление модулями в крейте на потенциале происходит с помощью программы, запущенной на компьютере. Программа управления также подробно описывается в главе три.

На Рисунке 10 показан вид источника ионов КРИОН-6Т на инжекторе NICA в ходе подготовки к ускорительному сеансу.

Созданная система управления ионной ловушкой обеспечила получение пучков ионов  $^{12}\text{C}^{6+}$ ,  $^{40}\text{Ar}^{16/13+}$ ,  $^{124}\text{Xe}^{28+}$  и  $^{78}\text{Kr}^{26+}$  на источнике ионов КРИОН-6Т в ускорительных сеансах комплекса NICA, что подтверждается работами [A3], [A4], [A6] и [B2].

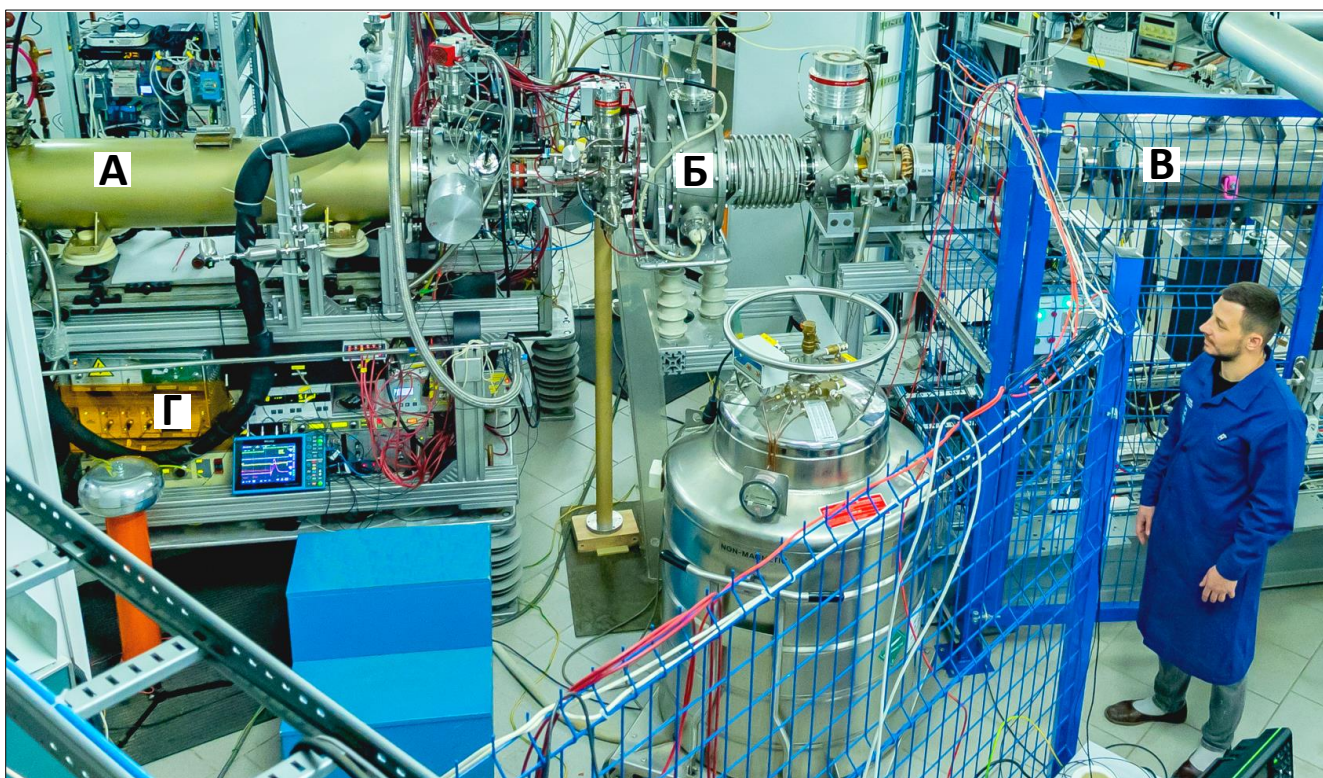


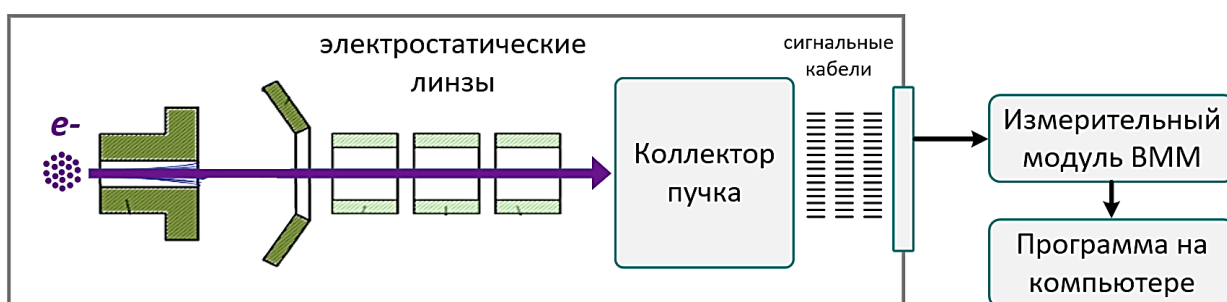
Рисунок 10. Вид высоковольтной платформы инжектора тяжелых ионов NICA:

- А) электронно-струнный источник ионов КРИОН-6Т;
- Б) канал транспортировки пучков низких энергии;
- В) линейный ускоритель с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой;
- Г) крейт с модулями системы управления ионной ловушкой источника ионов КРИОН-6Т.

Четвертая глава диссертации посвящена системе диагностики импульсных ионных и электронных пучков низких энергий. Решения и детали проделанной работы по данной теме опубликованы в работах [A2], [A4], [B3], [B4] и [B5].

Диагностика импульсных ионных и электронных пучков сводится к измерениям размеров, формы, временной растяжки и полного тока (или суммарного заряда) пучка в различных положениях его транспортировки от ионного источника до входа в ускоритель. Используя эти измеренные величины при различных значениях управляющих параметров, можно рассчитать поперечную температуру ионов в пучке и его поперечный эмиттанс. Перечисленные характеристики ионного пучка являются ключевыми для настройки всего ускорительного комплекса, зависят во многом от режима работы электронной пушки и выбранного режима ионизации для различных целевых ионов в источнике КРИОН.

На инжекторе NICA были созданы системы диагностики пучков, решающие приведенные задачи. Контроль размеров, формы, положения и тока импульсного электронного пучка, сформированного катодом электронной пушки ЭСИ КРИОН, выполняется согласно схеме диагностики пучков, показанной на Рисунке 11.



**Рисунок 11.** Схема электрон-ионной оптической системы источника ионов КРИОН-6Т с введенным коллектором пучка.

Коллектор пучка представляет собой конструкцию из 36 секций со сторонами длиной 4 мм и основания, вводимую в пространство дрейфа пучков (Рисунок 12).

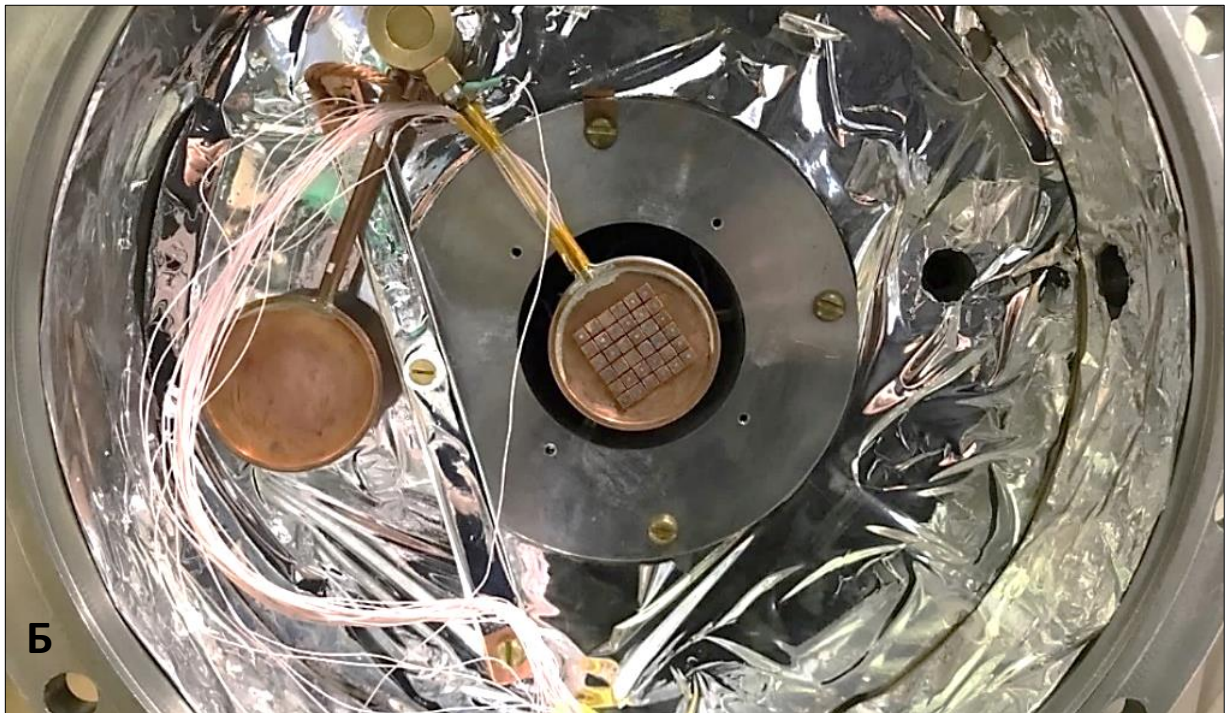
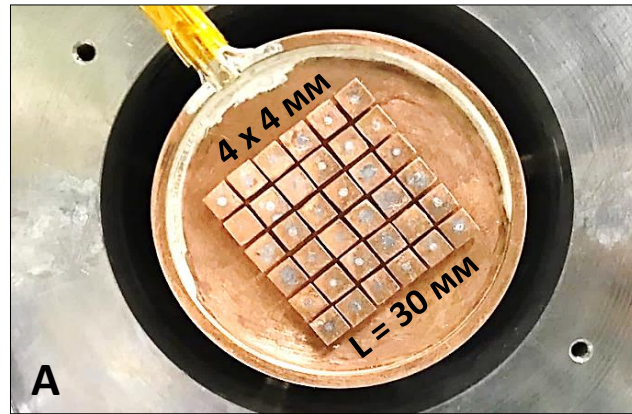


Рисунок 12. Вид коллектора пучков электронно-струнного источника ионов КРИОН-6Т:

А) многосекционный коллектор пучков;

Б) вакуумная камера с установленным вводным коллектором.

Согласно измерительной схеме, заряд пучка, высаженный на коллекторе поступает на входы измерительного модуля ВММ [А4], представляющего собой многоканальный импульсный аналого-цифровой преобразователь (АЦП) с интеграторами по входам.

Модуль ВММ содержит 48 каналов с настраиваемым диапазоном входного заряда в диапазоне от 0,1 до 25 нКл. Внешний вид измерительного модуля ВММ показан на Рисунке 13.

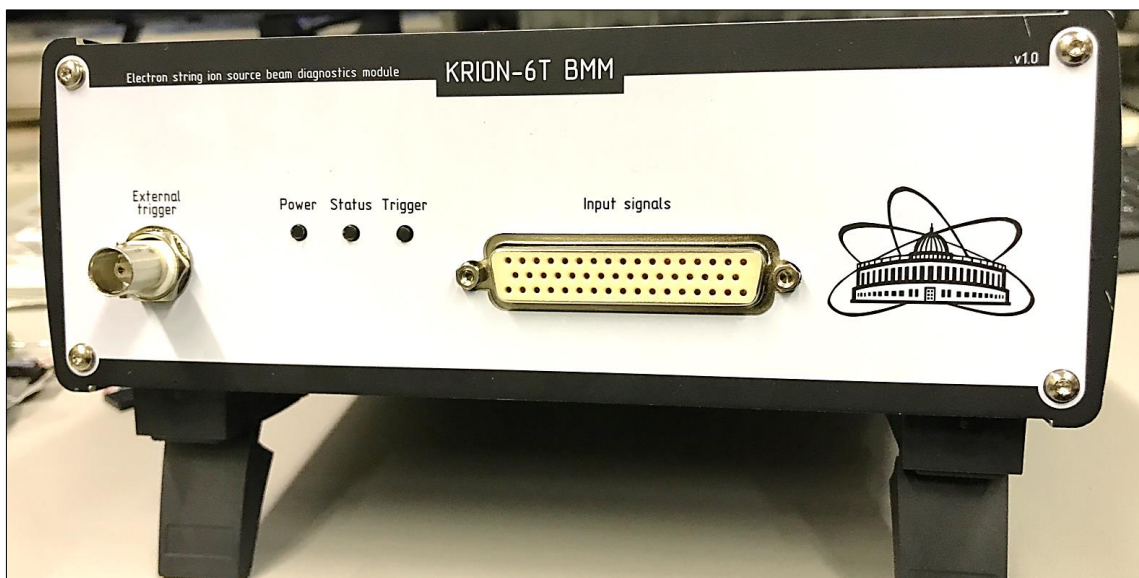


Рисунок 13. Вид измерительного модуля BMM.

Величины измеренных зарядов модуля BMM считываются программой управления на компьютере через интерфейс Ethernet. Программа управления и визуализации, представленная на Рисунке 14 содержит таблицу измерений по каналам, окно с визуализацией зарядов коллектора в виде 3D-гистограммы и график суммарного измеренного заряда.

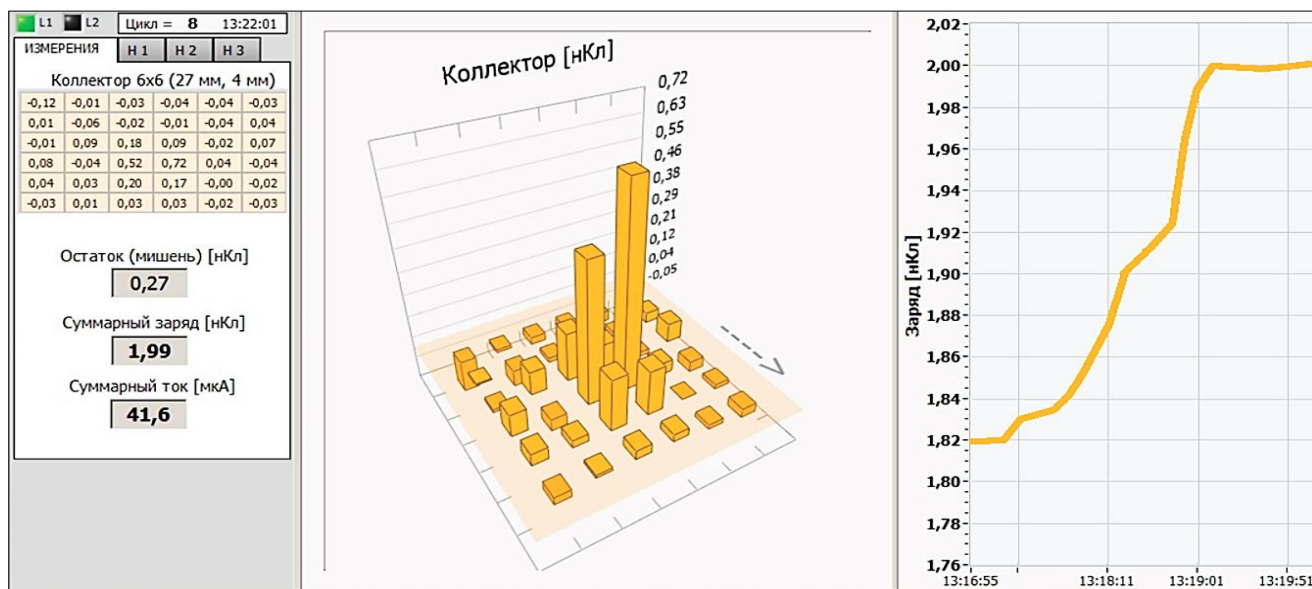


Рисунок 14. Вид программы управления и визуализации измерений для модуля BMM.

Схема диагностики пучков на основе вводимого коллектора пучка используется только на этапе настройки источника ионов и в моменты контроля параметров пучков. После получения оптимальной конфигурации электрон-ионной оптической

системы секционированный коллектор выводится из пространства дрейфа пучка для его инжекции в ускоритель.

Представленная схема диагностики пучков, включающая в себя созданные измерительный модуль EBMM и программу управления, позволяет измерять размеры, формы, положения и токи импульсных электронных и ионных пучков низких энергий в диапазоне от 0,1 до 25 нКл с точностью не хуже  $\pm 0,5\%$ . Ее использование во время ускорительных сеансов комплекса NICA, обеспечили настройку электрон-ионной оптической системы источника ионов КРИОН-6Т для получения оптимальных интенсивностей электронных и ионных пучков [A3].

Другой важной частью комплекса диагностики пучков является схема измерения поперечных профилей ионных пучков в каналах транспортировки пучка в различных положениях его транспортировки от ионного источника до входа в линейный ускоритель.

На инжекторе тяжелых ионов комплекса NICA используется система измерения поперечных профилей пучков на основе многопроволочных профилометров и созданных автором измерительной электроники и программного обеспечения визуализации, представленных в работах [A2], [A4], [B3], [B4] и [B5].

Схема получения поперечных профилей ионного пучка схожа с той, что показана выше на Рисунке 11. Отличия заключаются в том, что вместо секционированного коллектора пучка используются многопроволочные профилометры на керамическом основании (Рисунок 15), а для измерения заряда пучка ионов и визуализацию профилей обеспечивают измерительный модуль BPM v1.64 и программа визуализации на компьютере.

Нами использовались два варианта профилометров: один для стендовых экспериментов (Рисунок 15А) и второй, в каналах транспортировки пучка на инжекторе NICA (Рисунок 15Б). Характеристики профилометра для диагностики пучков при стендовых работах источника ионов КРИОН-6Т:

размер окна измерений – 10 мм, количество проволок – по 21 шт. двух плоскостях, шаг – 0,5 мм, сечение – 100 мкм, материал – позолоченный вольфрам.

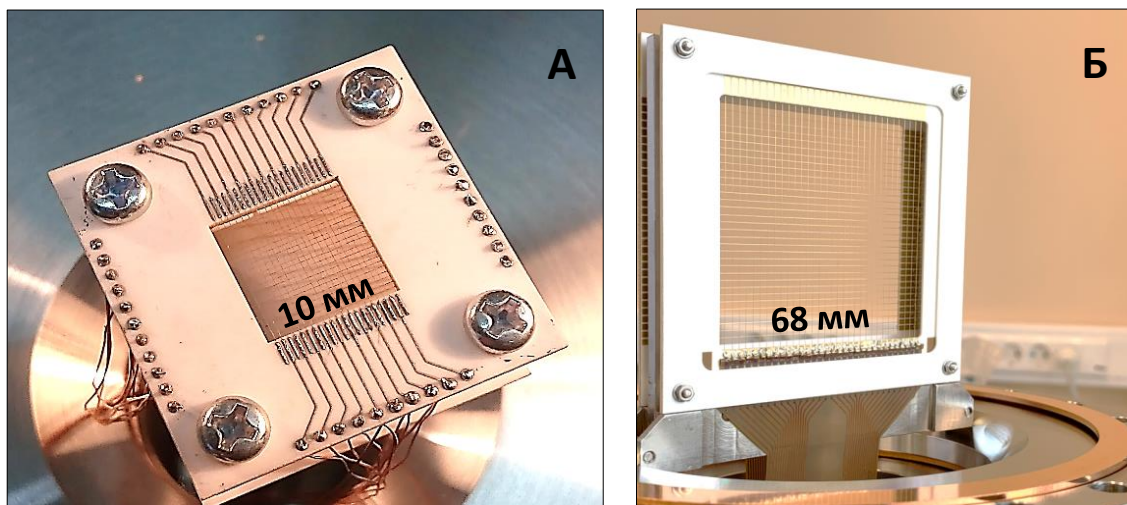


Рисунок 15. Многопроволочные профилометры пучка:

А) стендовый профилометр источника ионов КРИОН-6Т;

Б) профилометр каналов транспортировки пучков инжектора тяжелых ионов NICA.

Основной профилометр установлен в каналах транспортировки пучков низких и средних энергий инжектора тяжелых ионов NICA, имеет следующие характеристики: **размер окна – 68 мм**, количество проволок – по 32 шт. на каждой из двух плоскостей, шаг – 2 мм, сечение – 100 мкм, материал – позолоченный вольфрам. Измерительный модуль ВРМ v1.64 схож по структуре с модулем ВММ и также представляет собой многоканальный аналого-цифровой преобразователь с интеграторами по входу. Основная разница между модулями в том, что ВРМ v1.64 способен измерять исключительно малые, но только положительные заряды величиной от сотен фемтокулон до десятков нанокулон.

Для измерений зарядов величиной до 25 нКл, нами разработаны и применены встраиваемые аттенюаторы сигналов (Рисунок 16Б). Применение подхода измерений зарядов пучка с использованием аттенюаторов позволяет гибко подстраивать входной измеряемый заряд под динамический диапазон измерений модуля ВРМ v1.64 равный 12 пКл. Более подробное описание модуля ВРМ v1.64 приводится в главе 4 диссертации, на Рисунке 16 показан вид его печатной платы.

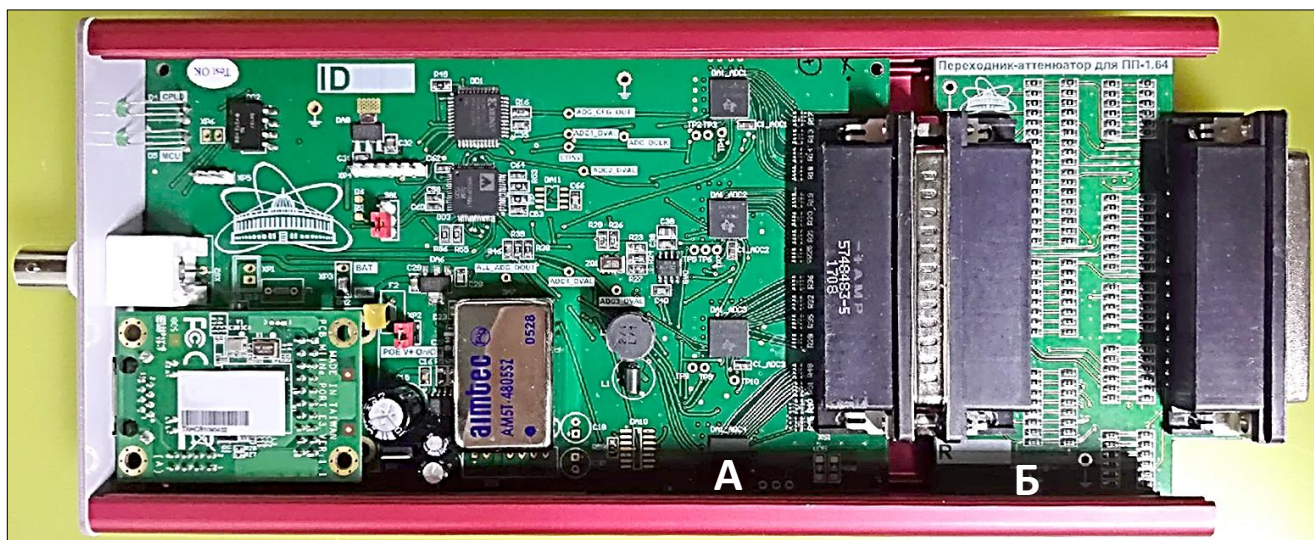


Рисунок 16. Вид измерительного модуля BPM v1.64:

А) основная плата; Б) аттенуатор входных сигналов.

Измерительные модули BPM v1.64 установлены в четырех контрольных точках с профилометрами пучков в канале транспортировки пучков из ЛУТИ в Бустер [16]. На Рисунке 17 показан вид измерительного модуля BPM v1.64 установленного рядом с профилометром ПО на входе в ЛУТИ.

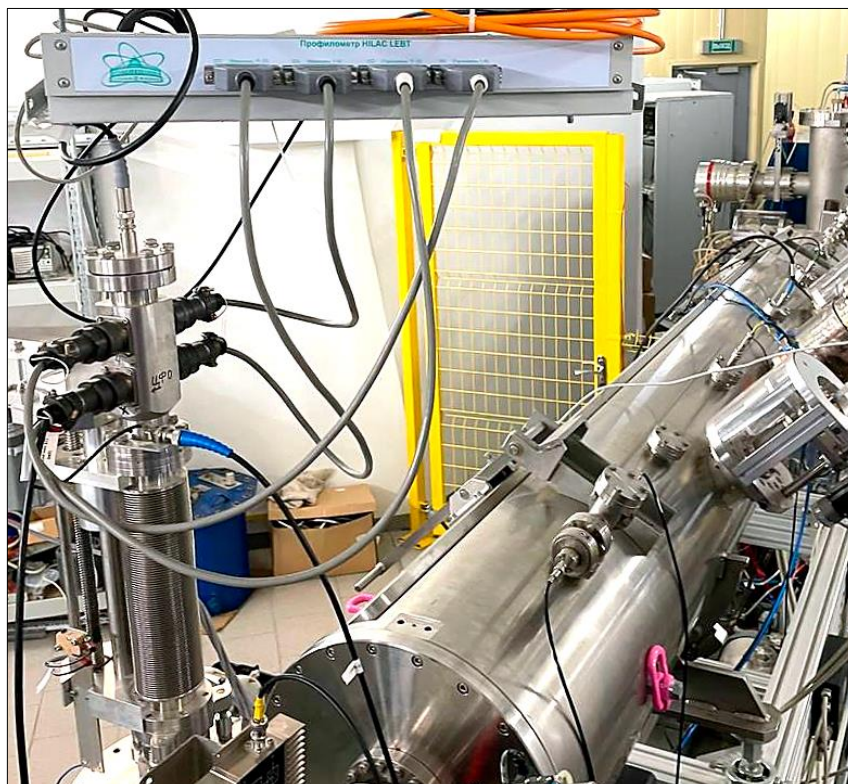


Рисунок 17. Вид одного из измерительных модулей BPM v1.64, подключенного к профилометру ПО в канале транспортировки пучков из ЛУТИ в Бустер NICA.



В процессе подготовки к ускорительным сеансам комплекса NICA подобраны оптимальные аттенюаторы, результат их применения для получения профилей можно оценить на Рисунках 18 и 19. Приведенные поперечные профили пучка ионов  $^{124}\text{Xe}^{26+}$  получены с профилометра ПО, установленного в канале транспортировки пучка на инжекторе тяжелых ионов комплекса NICA.

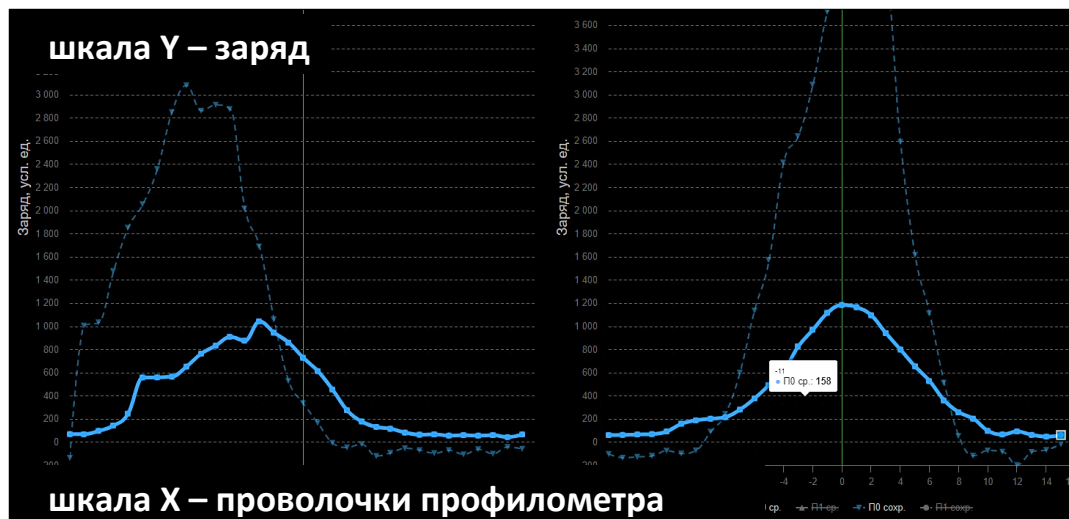


Рисунок 18. Измеренные на профилометре ПО поперечные профили пучка ионов  $^{124}\text{Xe}^{26+}$  при напряжении 0 В на фокусирующем соленоиде № 1 канала ЛУТИ/Бустер.

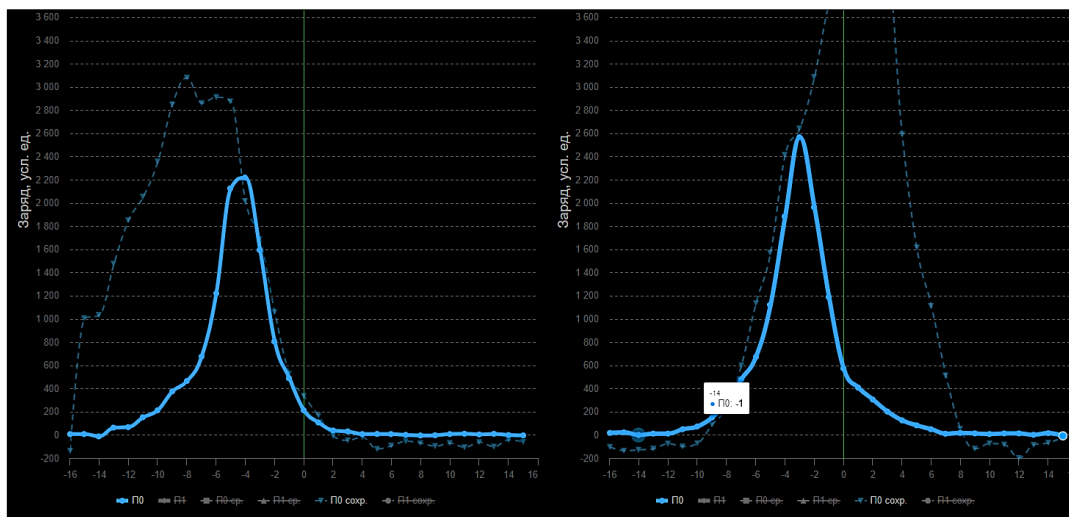


Рисунок 19. Измеренные на профилометре ПО поперечные профили пучка ионов  $^{124}\text{Xe}^{26+}$  при напряжении +800 В на фокусирующем соленоиде № 1 канала ЛУТИ/Бустер.

Измерения поперечных профилей пучков ионов обеспечили настройку ионно-оптической структуры канала транспортировки для инъекции пучков ионов  $^{124}\text{Xe}^{28+}$  в Бустер в ускорительных сеансах комплекса NICA [A3].

В заключении представляются следующие результаты работы:

1. создана система управления для электронно-струнного источника высокозарядных тяжелых ионов КРИОН-6Т, впервые обеспечившая получение ионов  $^{12}\text{C}^{6+}$ ,  $^{40}\text{Ar}^{16/13+}$ ,  $^{124}\text{Xe}^{28+}$  и  $^{78}\text{Kr}^{26+}$  в ускорительных сеансах инжектора тяжелых ионов NICA; система поддерживает:

- управление импульсной инжекцией электронов в ионную ловушку для формирования протяженного электронного пучка с энергией до 10 кэВ, током эмиссии до 30 мА;

основные особенности: количество дискретных шагов установки напряжения в цепи накала эмиттера  $N_{\text{шн}} = 2^{16}$ , измерение тока в цепи эмиттера с точностью не хуже  $\pm 5\%$ , измерение установленного напряжения накала и напряжения управления инжекцией электронов с точностью не хуже  $\pm 0,3\%$ ;

- управление ионной ловушкой с возможностью установления амплитуд потенциальных барьеров до +3,5 кВ и импульса экстракции ионов до +3,5 кВ  $\pm 1\%$ ;

2. создана система диагностики импульсных электронных и ионных пучков с энергиями до 5 МэВ/н для источника ионов КРИОН-6Т, обеспечившая измерения размера, формы и суммарного заряда пучков с точностью не хуже  $\pm 0,5\%$ ;

с ее помощью впервые на комплексе NICA проведены измерения поперечных профилей пучков ионов  $^{12}\text{C}^{6+}$ ,  $^{40}\text{Ar}^{16/13+}$ ,  $^{124}\text{Xe}^{28+}$  и  $^{78}\text{Kr}^{26+}$  с энергией 3,2 МэВ/н в канале транспортировки ЛУТИ/Бустер; полученные перечные профили обеспечили настройку ионно-оптической структуры канала транспортировки ЛУТИ/Бустер для инжекции пучка ионов в Бустер во время ускорительных сеансов комплекса NICA;

3. созданной системой управления впервые обеспечено получение ионов  $^{124}\text{Xe}^{28+}$  на источнике КРИОН-6Т в ускорительных сеансах комплекса NICA, где они впервые ускорены до энергии  $\sim 4$  ГэВ/н в цепочке ускорителей ЛУТИ/Бустер/Нуклотрон.

## Список публикаций по теме диссертации в рецензируемых журналах

- A1. *Boytsov, A.Yu.* Electron string ion sources for carbon ion cancer therapy accelerators / A.Yu. Boytsov, D.O. Ponkin [et al.] // *Review of Scientific Instruments*. vol. 86, no. 8, 13 Aug., 2015, p. 083308. American Institute of Physics. – ISSN: 0034-6748. – URL: <https://pubs.aip.org/aip/rsi/article-abstract/86/8/083308/357183/Electron-string-ion-sources-for-carbon-ion-cancer?redirectedFrom=fulltext>
- A2. *Segal, M. J.* Liquid metal ion source assembly for external ion injection into an electron string ion source (ESIS) / M. J. Segal, D. Ponkin [et al.] // *Review of Scientific Instruments*. vol. 87, no. 2, 20 Nov., 2015, p. 02A9913. American Institute of Physics. – ISSN: 0034-6748. – URL: <https://pubs.aip.org/aip/rsi/article-abstract/87/2/02A913/1022347/Liquid-metal-ion-source-assembly-for-external-ion?redirectedFrom=fulltext>
- A3. *Рассадов, Д.Н.* Перспективы использования источника многозарядных ионов «КРИОН-6Т» на инжекционном комплексе NICA: многократная инжекция ионов тяжелых элементов / Д.Н. Рассадов, Д.О. Понкин [и др.] // *Письма в «Физика элементарных частиц и атомного ядра»*. – 2024. – Т. 21. – № 3(254). – С. 281–289. – URL: [http://www1.jinr.ru/Pepan\\_letters/panl\\_2024\\_3/05\\_Rassadov\\_r.pdf](http://www1.jinr.ru/Pepan_letters/panl_2024_3/05_Rassadov_r.pdf)
- A4. *Butenko, E.A.* Electron string ion sources (ESIS) electronics development / E.A. Butenko, D. O. Ponkin [et al.] // *Physics of Particles and Nuclei Letters*, – 2024. – Vol. 21. – № 4 (255). – P. 777.  
– URL: [http://www1.jinr.ru/Pepan\\_letters/panl\\_2024\\_4/54\\_Butenko\\_2\\_ann.pdf](http://www1.jinr.ru/Pepan_letters/panl_2024_4/54_Butenko_2_ann.pdf)

- A5. *Boytsov, A.Yu. Cathode Assembly Electronics Development for Electron String Ion Sources (ESIS) / Yu. Boytsov, D. O. Ponkin [et al.] // Physics of Particles and Nuclei Letters. – 2023. – Vol. 20. – № 6. – P. 1519-1522. – URL: [http://www1.jinr.ru/Pepan\\_letters/panl\\_2023\\_6/38\\_Boitsov\\_ann.pdf](http://www1.jinr.ru/Pepan_letters/panl_2023_6/38_Boitsov_ann.pdf)*
- A6. *Butenko, E.A. Electron string ion sources (ESIS) ion trap control system development / D. O. Ponkin [et al.] // Physics of Particles and Nuclei Letters, Vol. 21, No. 4 (255). pp. 778, 2024. – URL: [http://www1.jinr.ru/Pepan\\_letters/panl\\_2024\\_4/53\\_Butenko\\_1\\_ann.pdf](http://www1.jinr.ru/Pepan_letters/panl_2024_4/53_Butenko_1_ann.pdf)*

### **Список публикаций по теме диссертации в трудах конференций**

- B1. *Donets, D.E. Electron Gun Control System for Electron String Ion Sources. / D.E. Donets, D.O. Ponkin [et al.] // Proc. of the IEEE 25th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM). – Altai. Russian Federation. – 28 June - 02 July 2024. – DOI: 10.1109/EDM61683.2024.10615220. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10615220>*
- B2. *Donets, E.D. ESIS ions injection, holding and extraction control system. / E. D. Donets, D.O. Ponkin [et al.] // EPJ Web of Conferences. – 2018. – Volume 177, 08002. – URL: [https://www.epj-conferences.org/articles/epjconf/pdf/2018/12/epjconf\\_ayss2018\\_08002.pdf](https://www.epj-conferences.org/articles/epjconf/pdf/2018/12/epjconf_ayss2018_08002.pdf)*
- B3. *Butenko, A.V. HILAC-Booster transport channel: The magnetic elements power supply and beam profile measurements / A. V. Butenko, D. O. Ponkin [et al.] // AIP Conference Proceedings 2163, 080002. – 2019. – URL: <https://doi.org/10.1063/1.5130117>*
- B4. *Egorov, D. Nuclotron injection beam profiles measurement system / D. Egorov, D. Ponkin [et al.] // EPJ Web of Conferences 201, 05002. – 2019. – URL: [https://doi.org/10.1051/epjconf/201920105002\\_AYSS-2018](https://doi.org/10.1051/epjconf/201920105002_AYSS-2018)*

- B5.** *Tuzikov, A.V. Beam transfer systems of NICA facility: from HILAC to Booster / A.V. Tuzikov, D. O. Ponkin [et al.] // Proc. of the 27th Russian Particle Acc. Conf. (RuPAC'21): Alushta, Russia JACoW Publishing. – ISBN: 978-3-95450-240-0. – ISSN: 2673-5539. – DIO: 10.18429/JACoW-RuPAC2021-WEA01. – URL: <https://inspirehep.net/files/f7b6ff73f6baba6e8614d9b2285a83ff>*
- B6.** *Butenko, A.V. Injection complex development for the NICA-project / A.V. Butenko, D.O. Ponkin [et al.] // Proc. of the 29th Linear Accelerator Conference (LINAC'18): Beijing, China, 16-21 September, 2018. – URL: <https://accelconf.web.cern.ch/linac2018/papers/th1p02.pdf>*
- B7.** *Donets, D.E. Cryogenic thermometry system for ESIS «KRION-6T» / D. E. Donets, D.O. Ponkin [et al.] // Proc. of the XXIV International Symposium Nuclear Electronics & Computing (NEC'13): Varna, Bulgaria, September 9-16, 2013. – Dubna: JINR, – P. 291, – P. 109 – 113. – 2013.*

## Список литературы

1. NICA heavy-ion collider at JINR (Dubna). Status of accelerator complex and first physics at NICA / G. Trubnikov, A. Butenko, V. Golovatyuk [et al.] : Journal of Physics Conference Series. – 2023. – DOI: 10.1088/1742-6596/2586/1/012013. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2586/1/012013>
2. Кекелидзе, В.Д. Технический проект объекта «Комплекс NICA». Раздел. Техническая спецификация (паспорт) объекта «Комплекс NICA» [Текст] / В. Д. Кекелидзе, Ю. К. Потребеников. – Дубна, 2018. – 90 с.
3. Kapishin, M.N. The Report on Project «Studies of Baryonic Matter at the Nuclotron (BM@N)» 02-0-1065-2007/2023 [Текст] / М. N. Kapishin. — Dubna, 2021. — 67 с. — URL: [https://bmn.jinr.ru/wp-content/uploads/2022/10/BMNproject\\_2021cor2.pdf](https://bmn.jinr.ru/wp-content/uploads/2022/10/BMNproject_2021cor2.pdf)
4. Аверичев, А.С. и др. Технический проект ускорительного комплекса NICA ; под общ. ред. И. Н. Мешкова, Г. В. Трубникова ; Объед. ин-т ядерных исслед. - Дубна : ОИЯИ, 2015.
5. Донец, Е.Д. Авторское свидетельство СССР № 248860. Способ получения многозарядных ионов – № 1139278/26-25; заявлено 16.03.1967 ; опубликовано 18.11.1969, Бюл. № 24, 65.
6. Донец, Е.Д. Криогенный электронно-лучевой ионный источник "Крион-2" / Е.Д.Донец, В.П.Овсянников. – Дубна : ОИЯИ, 1976. – 15 с. – (ОИЯИ ; P7-9799). – URL: <http://inis.jinr.ru/sl/NTBLIB/JINR-P7-9799.pdf>. – Библиогр.: 17.
7. Donets, E.D. Physics and Technology of Ion Sources, Chap. 12 / E. D. Donets, ed. by I. G. Brown. – New York : Wiley & Sons, 1989. – 245 p.
8. Донец, Е.Д. Получение ионов  $\text{Xe}^{4+8+}$  в электронно-лучевом ионизаторе "КРИОН-2" / Е.Д.Донец, В.П.Овсянников, В.Г.Дудников. – Дубна : ОИЯИ, 1979. – 10

- с. : ил. – (ОИЯИ ; P7-12905). – URL: <http://inis.jinr.ru/sl/NTBLIB/JINR-P7-12905.pdf>. – Библиогр.: с.10.
9. *Донец, Е.Д.* Электронно-лучевой метод глубокой ионизации атомов // Физика элементарных частиц и атомного ядра. – 1982. – Т.13, – вып. 5, – С. 941-981. – УДК 621.3.628. – URL: [http://www1.jinr.ru/Archive/Pepan/1982-v13/v-13-5/pdf\\_obzory/v13p5\\_1.pdf](http://www1.jinr.ru/Archive/Pepan/1982-v13/v-13-5/pdf_obzory/v13p5_1.pdf)
10. Studies of the electron string mode of EBIS operation/ E. D. Donets [et al.] : AIP Conf. Proc. – 2001. P. 103–118. – URL: <https://doi.org/10.1063/1.1390104>
11. *Овсянников, В.П.* Электронная пушка источника многозарядных ионов "Крион-1" / В.П.Овсянников. – Дубна : ОИЯИ, 1976. – 12 с. – (ОИЯИ ; 13-9584). – URL: <http://inis.jinr.ru/sl/NTBLIB/JINR-13-9584.pdf>. – Библиогр.: 12.
12. *Son, H.J.* et al. Electron gun and collector for RAON EBIS charge breeder // J. Instrum. – 2021. – Vol. 16. – № 09. – P. T09001. – DOI:10.1088/1748-0221/16/09/T09001.
13. *Kewlani, H.M.* Electron cyclotron resonance ION source control system / H. M. Kewlani, P. Roychowdhury, D. P. Chakravarthy, L. Mishra, K. C. Mittal // ResearchGate. – 2012. – P. 217–218. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/290088733\\_Electron\\_cyclotron\\_resonance\\_ION\\_source\\_control\\_system](https://www.researchgate.net/publication/290088733_Electron_cyclotron_resonance_ION_source_control_system)
14. *Höltermann, H.* Fast Ion extraction from the MedEBIS. / H. Höltermann, R. Becker, M. Kleinod, I. Müller // J. Phys. Conf. Ser. – 2004. – URL: <https://pubs.aip.org/aip/rsi/article-abstract/75/5/1554/784212/Electronics-for-fast-ion-extraction-from-EBIS?redirectedFrom=fulltext>
15. *Höltermann, H.* Electronics for fast ion extraction from EBIS devices. / H. Höltermann, R. Becker, M. Kleinod, I. Müller. (2004). Rev. Sci. Instrum., 75(5), 1554–1556. doi: 10.1063/1.1691517

16. *Kuznetsov, G.I.* IrCe cathodes for EBIS / G.I. Kuznetsov // J. Phys.: Conf. Ser. 2 35, – 2004. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2/1/005>
17. Beam Transfer Systems of NICA Facility: from HILAC to Booster [Текст] / A. V. Tuzikov [et al.] // Proc. RuPAC'21 (Alushta, Russia). – JACoW Publishing, Geneva, Switzerland, 09/2021. – P. 61–64. – (Russian Particle Accelerator Conference; 27). – URL: <https://jacow.org/rupac2021/papers/wea01.pdf>.