Научная статья

УДК 533.9.082.7; 539.1.075 DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-4-44-53

# Технический проект системы диагностики пучков ионов в фазовом пространстве\*

# Андрей Сергеевич Фофанов<sup>1</sup>, Ирина Васильевна Мясникова Александр Петрович Клинов, Юрий Алексеевич Шаталов Владимир Алексеевич Балакин

Акционерное общество «НИИЭФА им. Д. В. Ефремова» Санкт-Петербург, Россия

<sup>1</sup>andreiinord@yandex.ru

#### Аннотация

Повышение требований к современным ускорительным комплексам требует точных данных об инжектируемых в ускоритель ионных пучках. В данной работе представлена система диагностики ионных пучков, реализующая метод четырех щелей и позволяющая измерять распределение плотности тока пучка в четырехмерном фазовом пространстве (ФП) с высокой точностью. Описываются технические решения и особенности конструкции, направленные на получение проектных параметров системы: диапазон исследуемых токов пучка от 1 пА до 20 мА с энергией до 50 кэВ, пространственное разрешение от 6 мм до 50 мкм.

Ключевые слова

ионный пучок, фазовое пространство, метод четырех щелей, эмиттанс

Благодарности

Авторы выражают признательность Ю. В. Зуеву и А. П. Строкачу за помощь при написании статьи и конструктивные советы, касающиеся формулировок излагаемого материала, а также всем сотрудникам АО «НИИЭФА», внесшим вклад в данную работу.

Для цитирования

Фофанов А. С., Мясникова И. В., Клинов А. П., Шаталов Ю. А., Балакин В. А. Технический проект системы диагностики пучков ионов в фазовом пространстве // Сибирский физический журнал. 2023. Т. 18, № 4. С. 44–53. DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-4-44-53

# **Technical Project of the Ion Beam Diagnostics System in Phase Space**

Andrey S. Fofanov<sup>1</sup>, Irina V. Myasnikova, Alexandr P. Klinov Yuri A. Shatalov, Vladimir A. Balakin

> JSC "NIIEFA", Saint-Petersburg, Russia

> <sup>1</sup>andreiinord@yandex.ru

Abstract

Increasing requirements for modern acceleration complexes require precise data on ion beams injected into the accelerator. This paper presents a system of ion beam diagnostics that implements the four-slit method and makes it possible to measure the beam current density distribution in the four-dimensional phase space (PS) with high precision. Technical

\*Статья написана по материалам конференции Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC'23), Budker INP, 11–15 September 2023.

© Фофанов А. С., Мясникова И. В., Клинов А. П., Шаталов Ю. А., Балакин В. А., 2023

solutions and design features aimed at obtaining the design parameters of the system are described: the range of investigated beam currents from 1 pA to 20 mA with energy up to 50 keV, spatial resolution from 6 mm to 50  $\mu$ m.

Keywords

ion beam, phase space, four-slit method, emittance

Acknowledgements

The authors express their gratitude to Y.V. Zuev and A.P. Strokach for their help in writing this paper and constructive advice concerning the wording of the material presented, as well as to all employees of JSC "NIIEFA" who contributed to this work.

For citation

Fofanov A. S., Myasnikova I. V., Klinov A. P., Shatalov Yu. A., Balakin V. A. Technical project of the ion beam diagnostics system in phase space. *Siberian Journal of Physics*, 2023, vol. 18, no. 4, pp. 44–53 (in Russ). DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-4-44-53

## Введение

В настоящее время в АО «НИИЭФА» разрабатывается ряд электрофизических установок, включая циклотрон многозарядных ионов [1] и оборудование масс-сепараторов тяжелых элементов [2]. Достижение проектных параметров этих установок предполагает применение источников ионов с высоким качеством пучка и проведение прецизионного моделирования динамики частиц. В частности, необходимо: проведение оптимизации конструкции критичных элементов ионных источников, определение их оптимальных режимов работы, минимизация аберраций пучка и потерь тока по всему тракту. Решение данных задач требует наличия детальной информации о фазовых характеристиках ионного пучка на выходе из источника.

Известно множество методов получения информации о фазовых характеристиках ионных пучков. Методы двух щелей, peper-pot и Allison scanner позволяют измерять 2D-проекции фазового объема (ФО). Методами поперечных сечений и quadrupole scanning можно определить параметры Твисса фазового эллипса. Информации, получаемой данными методами, недостаточно для высокоточного описания состояния пучка.

Метод четырех щелей (4-Slit Method) [3; 4] позволяет измерять распределение фазовой плотности пучка  $\rho(x, y, x', y')$  в четырехмерном  $\Phi\Pi$ .

Для максимальной точности измерения распределения в фазовом пространстве (пространственного разрешения) в данном методе необходим коллиматор с минимальной шириной щели. В первых подобных установках ширина щели составляла 1–2 мм [5], достигая 500–100 мкм в более поздних [6]. В разработанной системе диагностики применяются щелевые коллиматоры с шириной щели до 50 мкм, точность позиционирования которых относительно оси перемещения достигает 10 мкм. Уменьшение ширины щели коллиматора приводит к необходимости измерения сверхмалых величин токов, решение данной задачи становится возможным за счет применения современных высокочувствительных измерительных приборов и экранированных измерительных кабелей.

В рамках данной системы имеется возможность реализации метода двух щелей, позволяющего измерять проекции ФО на фазовые плоскости  $\{x, x'\}$  и  $\{y, y'\}$ .

Разработка данной системы направлена на развитие в АО «НИИЭФА» современной экспериментальной базы по диагностике ионных пучков различной интенсивности в широком спектре масс и энергий и проведение материаловедческих исследований по их взаимодействию с веществом.

#### Основные технические решения

Разработанная система диагностики BEAM-4D состоит из двух модулей диафрагм, разделенных дрейфовым промежутком, и датчика тока ионного пучка (рис. 1).



*Рис. 1.* Общий вид системы диагностики: модуль щелевых диафрагм (1); датчик тока ионного пучка (2); труба дрейфа (3)
*Fig. 1.* General view of the diagnostic system: slit diaphragm module (1); ion beam current detector (2); drift tube (3)

Модуль диафрагм предназначен для выделения малой части пучка (beamlet) и образуется парой щелевых коллиматоров с взаимно перпендикулярной ориентацией щелей.

Последовательным обходом всех точек поперечного сечения пучка диафрагмами первого модуля выделяются частицы пучка с координатами  $\{x, y\}$ . Определение координат  $\{x', y'\}$  проводится сканированием выделенной части пучка диафрагмами второго модуля вдоль осей x, y.

Длина дрейфового промежутка может изменяться в диапазоне от 0,3 до 2 м в зависимости от угловой расходимости пучка таким образом, чтобы на втором модуле диафрагм beamlet имел достаточные размеры для обеспечения требуемого углового разрешения.

После второго модуля диафрагм располагается датчик тока, предназначенный для измерения величины тока выделенной (прошедшей) части ионного пучка.

Разрешение по пространственным координатам ФП может варьироваться от 50 мкм до 6 мм, и от 10 мрад до 25 мкрад по угловым.

Аксептанс *A*<sub>4D</sub> измерительного канала [7], образуемого двумя модулями диафрагм и трубой дрейфа:

$$A_{4D} \approx \frac{\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta x' \cdot \Delta y'}{16 L^2} = \frac{\Delta d^4}{16 L^2} \ [\text{MM}^2 \cdot \text{pag}^2],$$

где  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta x'$ ,  $\Delta y' = d$  – ширина каждой щели, мм; L – длина дрейфового промежутка, мм.

Следовательно, при L = 2 м и  $\Delta d = 50$  мкм  $A_{4D} = 98$  нм<sup>2</sup> · нрад<sup>2</sup>, а при L = 0,3 м и  $\Delta d = 6$  мм  $A_{4D} = 0,9$  нм<sup>2</sup> · нрад<sup>2</sup>, что позволяет измерять абсолютное значение фазовой плотности пучка с высокой точностью.

В состав BEAM-4D также входят системы обеспечения: контрольно-измерительная, вакуумная, пневматическая и система водяного охлаждения.

Система позволяет диагностировать пучки одно- и многозарядных ионов массой от 1 до 260 а.е.м. и энергией до 50 кэВ поперечным сечением до 50 × 50 мм<sup>2</sup>.

## Модуль диафрагм

Коллиматоры монтируются в вакуумной камере, отсекаемой от тракта шиберными затворами (рис. 2). Все элементы модуля диафрагм устанавливаются на лабораторную платформу, рама которой выполнена из конструкционного алюминиевого профиля.

При ширине щели 50 мкм и точности перемещения 10 мкм становится важным изоляция диафрагм от источников внешних вибраций. Для этого в штатном положении платформа устанавливается на виброопоры.



 Рис. 2. Модуль диафрагм: диафрагма щелевая (1); камера вакуумная (2); платформа лабораторная (3)
Fig. 2. Diaphragm module: slit diaphragm (1); vacuum chamber (2); laboratory platform (3)

Для обеспечения пространственного позиционирования и взаимосогласованного ориентирования диафрагм разработаны домкраты вертикального перемещения и механизмы горизонтального перемещения, являющиеся частями подставки юстировочной. Точность позиционирования по осям (*x*, *y*) составляет 10 мкм линейного перемещения и 0,1° углового по осям ( $R_x$ ,  $R_v$ ,  $R_z$ ).

# Коллиматор щелевой

Щель коллиматора образована двумя створками, установленными в пазы держателя (рис. 3). Края щели имеют толщину 50 мкм. Регулировка апертуры (ширины щели) коллиматора осуществляется вручную калиброванными пластинками в диапазоне от 50 мкм до 6 мм. Фиксация положения створок производится винтовыми прижимами.

Большая ширина щели позволяет быстро сканировать всю площадь поперечного сечения пучка и необходима для оперативного измерения его профиля.

Для предотвращения термических деформаций и обеспечения стабильности размеров щели коллиматора при облучении его створки изготовляются из вольфрамового сплава ВНД-МП, обладающего малыми коэффициентами термического расширения и ионного распыления. Их термостабилизация осуществляется системой водяного охлаждения. Данные решения позволяют минимизировать инструментальную погрешность измерений, а также уменьшить скорость деградации створок.



*Puc. 3.* Коллиматор щелевой с приводом *Fig. 3.* Slit Collimator with actuator

Позиционирование коллиматора осуществляется прецизионным вакуумным вводом линейного перемещения с шаговым серводвигателем с точностью 10 мкм в диапазоне от 0 до 200 мм. Конструкция штока коллиматора оптимизирована для минимизации прогиба.

## Модуль датчика тока ионного пучка

Чувствительным элементом датчика тока (рис. 4, *a*) является цилиндр Фарадея (ЦФ) (рис. 4, *б*). Конструкция ЦФ оптимизирована для минимизации погрешности измерений. Коллектор ионов ЦФ представляет собой медный цилиндр длиной 50 мм с конической полостью внутри. Для предотвращения утечки тока коллектор изолирован от корпуса фторопластовыми кольцами. Для защиты от оседания внешних частиц коллектор помещен в корпус (экран), в ко-

тором проделаны несколько групп отверстий для обеспечения откачки внутренних полостей ЦФ. Для подавления вторичной ион-электронной эмиссии перед коллектором ионов устанавливается кольцо-супрессор, на который подается потенциал –300 В.

Для измерения сигнала с ЦФ предполагается использовать фемтоамперметр Keysight B2981B и прецизионный мультиметр RIGOL DM3068. Для их соединения с ЦФ будут применяться триаксиальные кабели, что должно позволить минимизировать шумы. Расчетная относительная погрешность измерительной системы не превышает 0,1 % при отсутствии внешних помех. Подобные технические решения применялись рядом авторов [8; 9]. Анализ их опыта дает основание ожидать, что представленные технические решения позволят измерять величину токов выделенных частей пучка интенсивностью от 1 пА до 200 мкА.



*Рис. 4.* Датчик тока ионного пучка: в сборе (*a*); цилиндр Фарадея слаботочный (*б*); вводы измерительные (*1*); цилиндр Фарадея (*2*); камера вакуумная (*3*)
*Fig. 4.* Ion beam current sensor: assembled (*a*); low-current Faraday cup (*б*); measuring inlets (*1*); Faraday cylinder (*2*); vacuum chamber (*3*)

Для измерения тока ионных пучков низкой интенсивности в дальнейшем планируется применение полупроводниковых детекторов ионизирующих излучений.

## Контрольно-измерительная система

Оптимизация источников ионов и их согласование с элементами ИОС осуществляется в рамках факторных экспериментов, что требует многократных измерений. При максимальной скорости перемещения щели 1,5 мм/с и точности позиционирования 10 мкм, время обхода всего ФО для пучка диаметром 10 мм составит 33 мин и 45 с для любой из его 2D-проекции.

Для управления, измерения, регистрации и обработки сигналов разработана контрольно-измерительная система (КИС) на основе трехуровневой архитектуры (рис. 5). Собираемые КИС данные в режиме реального времени передаются на пульт оператора, где они обрабатываются и сохраняются в базе данных под управлением СУБД PostgreSQL. По итогу каждого сеанса измерений формируется лог-файл, содержащий всю измерительную информацию и историю состояния всех устройств и систем.

Оператор может устанавливать диапазоны и шаг перемещений щелевых коллиматоров, контролировать параметры обеспечивающих систем и оперативно изучать результаты измерений.



*Puc. 5.* Общая архитектура КИС *Fig. 5.* General architecture of the Control and Measurement System

Представленная архитектура позволяет быстро интегрировать новое оборудование и обеспечивает совместимость с существующей стендовой базой.

При диагностике пучка диаметром 30 мм, при ширине щелей 50 мкм и использовании формата представления чисел типа double суммарный объем информации составит около 15,5 Гб. Для ее обработки применяются оптимизированные библиотеки, алгоритмы параллелизации вычислений и каналы передачи данных с высокой пропускной способностью (1–2,5 Гбит/с).

## Обработка и анализ данных

В результате каждого измерения формируется массив (x, y, x', y', I), содержащий измеренное значение величины тока I в заданных координатах (x, y, x', y'). Последовательным обходом всех координат определяется дискретное представление распределения частиц  $\rho(x, y, x', y')$ в четырехмерном ФП. Для уменьшения погрешности в каждой точке ФО выполняется не менее 30 измерений величины тока с последующей стандартной статистической обработкой.

Поскольку визуально представить четырехмерное ФП довольно сложно, его анализ проводится методом проекций. Для этого измеренное распределение проецируется на шесть фазовых плоскостей:

$$\rho_{2D}(x,x') = \int \int \rho(x,y,x',y') dy dy',$$
  
$$\rho_{2D}(y,y') = \int \int \rho(x,y,x',y') dx dx'.$$

ISSN 2541-9447 Сибирский физический журнал. 2023. Том 18, № 4 Siberian Journal of Physics, 2023, vol. 18, no. 4 Также возможно построение 2D-сечений ФП:

$$\rho_{2D}^{s}|_{y=i,y'=j}(x,x') = \rho(x,i,x',j),$$
  
$$\rho_{2D}^{s}|_{x=i,x'=j}(y,y') = \rho(i,y,j,y').$$

На каждой проекции и сечении при помощи RMS метода [10] строится фазовый эллипс, определяются параметры Твисса и вычисляется 2D-RMS эмиттанс.

Вычисление 4D-эмиттанса (гиперэмиттанса) выполняется путем интегрирования  $\Phi O$  по всем точкам  $\Phi \Pi$  (элементарным гиперобъемам), в которых измеренная фазовая плотность  $\rho(x, y, x', y')$  выше порогового значения *t*, определяемого уровнем шумов:

$$\varepsilon_4 = \frac{1}{\pi^2} \iint \int \int dx \, dx' \, dy \, dy' \, \left[\pi^2 \cdot \mathsf{MM}^2 \cdot \mathsf{pag}^2\right]_{q(x,y,x',y') \ge t}$$

В дискретной форме:

$$\varepsilon_{4} = \sum_{i,j,k,l} \sum_{\epsilon} \sum_{\rho \ge t} \sum_{t} \frac{\Delta x_{i} \cdot \Delta x_{j}' \cdot \Delta y_{k} \cdot \Delta y_{l}'}{\pi^{2}},$$

где  $\Delta x$  и  $\Delta y$  – ширина щелей по осям x и y, мкм;  $\Delta x'$  и  $\Delta y'$  – угловое разрешение по осям x' и y', мрад.

Более точных результатов можно достичь применением методов аппроксимации многомерных данных или аналитического описания ФО.

## Заключение

В результате данной работы была разработана система диагностики, позволяющая измерять распределение фазовой плотности ионных пучков в четырехмерном фазовом пространстве.

Были разработаны ее основные узлы: щелевые коллиматоры с апертурой 50 мкм и точностью позиционирования 10 мкм, лабораторные платформы с механизмами пространственного регулирования, датчик тока ионного пучка (цилиндр Фарадея и инструментальной погрешностью не более 0,1 %) и контрольно-измерительная система, позволяющая регистрировать ионные пучки интенсивностью до 1 пА.

Отличительными особенностями данной системы являются: высокое пространственное разрешение, точность измерений, автоматизированный режим работы, что в совокупности позволяет получать достоверные и воспроизводимые данные об ионных пучках.

Модульность конструкции такой системы позволяет быстро перестраивать ее для диагностики ионных пучков с различными параметрами.

В настоящее время часть узлов изготовлена, проводятся их предварительные испытания. Разрабатывается программное обеспечение для обработки и анализа экспериментальных данных. Ведется подготовка к проведению пусконаладочных работ и вводу системы в эксплуатацию.

## Список литературы

1. **Osina Y. et al.** Cyclotron of Multicharged Ions // Proceedings of the RuPAC2021. Alushta, Russia: JACoW Publishing, Geneva, Switzerland, 2021. P. 3.

- 2. Завьялов В. Н. Электромагнитный масс-сепаратор для изотопного обогащения тяжелых актиноидов. Реализация проекта СТЭ. ОИЯИ, 2021.
- 3. Москалев В. А., Сергеев Г. И., Шестаков В. Г. Диагностика пучков заряженных частиц. М.: Атомиздат, 1973. 160 с.
- 4. Steenbergen A. V. Evaluation of particle beam phase space measurement techniques // Nuclear Instruments and Methods. 1967. Vol. 51, № 2. P. 245–253.
- Steenbergen A. V. AGS Preinjector Beam Emittance Area and Emittance Area Density Distribution Measurements // Proceedings of the 1962 Conference on Linear Accelerators for High Energies. Upton, New York, USA, 1962. P. 338–380.
- 6. Wang M. et al. Design and Test Results of a Double-Slit Emittance Meter at XiPAF // Proceedings of the 7th Int. Beam Instrumentation Conf. Shanghai, China, 2019. Vol. WEPC09. P. 509–511.
- Баталин В. А., Куйбида Р. П., Шерман В. Е. Измерения эмиттанса пучка на выходе линейного ускорителя И-2. Институт теоретической и экспериментальной физики ИТЭФ-29, 1973. Р. 21.
- 8. Harasimowicz J. et al. Beam diagnostics for low energy beams // Phys. Rev. ST Accel. Beams. 2012. Vol. 15, № 12. P. 122801.
- 9. Harasimowicz J., Welsch C. P. Faraday Cup for Low-Energy, Low-Intensity Beam Measurements at the USR. Santa Fe, New Mexico, USA, 2010. P. 3.
- 10. Minty M. G., Zimmermann F. Measurement and control of charged particle beams. Berlin; N.Y.: Springer, 2003. 364 p.

# References

- 1. **Osina Y. et al.** Cyclotron of Multicharged Ions. *Proceedings of the RuPAC2021*. Alushta, Russia6 JACoW Publishing, Geneva, Switzerland, 2021, p. 3.
- 2. Zavyalov V. N. Electromagnetic mass-separator for isotopic enrichment of heavy actinoids. Realization of the STE project. JINR, 2021. (in Russ.)
- 3. Moskalev V. A., Sergeev G. I., Shestakov V. G. Diagnostics of charged particle beams. Moscow, Atomizdat Publ., 1973, 160 p. (in Russ.)
- 4. Steenbergen A. V. Evaluation of particle beam phase space measurement techniques. *Nuclear Instruments and Methods*, 1967, vol. 51, № 2, pp. 245–253.
- Steenbergen A. V. AGS Preinjector Beam Emittance Area and Emittance Area Density Distribution Measurements. *Proceedings of the 1962 Conference on Linear Accelerators for High Energies*. Upton, New York, USA, 1962, pp. 338–380.
- 6. Wang M. et al. Design and Test Results of a Double-Slit Emittance Meter at XiPAF. *Proceedings* of the 7th Int. Beam Instrumentation Conf. Shanghai, China, 2019, vol. WEPC09, pp. 509–511.
- 7. Batalin V. A., Kuibida R. P., Sherman V. E. Measurements of beam emittance at the output of the linear gas pedal I-2. Institute of Theoretical and Experimental Physics ITEF-29, 1973, pp. 21. (in Russ.)
- 8. Harasimowicz J. et al. Beam diagnostics for low energy beams. *Phys. Rev. ST Accel. Beams*, 2012, vol. 15, № 12, pp. 122801.
- 9. Harasimowicz J., Welsch C. P. Faraday Cup for Low-Energy, Low-Intensity Beam Measurements at the USR. Santa Fe, New Mexico, USA, 2010, p. 3.
- 10. Minty M. G., Zimmermann F. Measurement and control of charged particle beams. Berlin; NY, Springer, 2003, 364 p.

## Информация об авторах

Андрей Сергеевич Фофанов, инженер-исследователь

Ирина Васильевна Мясникова, инженер-конструктор

Александр Петрович Клинов, ведущий конструктор

## Юрий Алексеевич Шаталов, ведущий инженер

# Владимир Алексеевич Балакин, инженер-исследователь

# Information about the Authors

Andrey S. Fofanov, Research Engineer Irina V. Myasnikova, Design Engineer Alexandr P. Klinov, Lead Design Engineer Yuri A. Shatalov, Lead Engineer Vladimir A. Balakin, Research Engineer

Статья поступила в редакцию 15.09.2023; одобрена после рецензирования 19.09.2023; принята к публикации 24.11.2023

The article was submitted 15.09.2023; approved after reviewing 19.09.2023; accepted for publication 24.11.2023