НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ
март–апрель 2025 Том 25 № 2 http://ntv.ifmo.ru/
SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS
March–April 2025 Vol. 25 No 2 http://ntv.ifmo.ru/en/
ISSN 2226-1494 (print) ISSN 2500-0373 (online)

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-2-366-372
УДК 539.1.078

Двухосевой манипулятор для измерения профиля интенсивности атомарных и ионных пучков

Александр Анатольевич Васильев[1], Марат Евгеньевич Вznуздаев[2], Кузьма Александрович Ившин[3], Сергей Степанович Киселев[4]✉, Александр Николаевич Соловьев[5], Виктор Васильевич Фимушкин[6]

[1,2] Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Гатчина, 188300, Российская Федерация
[2,4] Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация
[3,5,6] Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, 141980, Российская Федерация

[1] vasillie@gmail.com, https://orcid.org/0009-0002-5219-7215
[2] vznuzdaev_me@pnpi.nrcki.ru, https://orcid.org/0000-0003-4448-0539
[3] ivshin@jinr.ru, https://orcid.org/0000-0001-8403-0706
[4] sskiselev@itmo.ru✉, https://orcid.org/0009-0001-5464-4915
[5] solovev@jinr.ru, https://orcid.org/0000-0002-5355-5996
[6] fimushkin@jinr.ru, https://orcid.org/0009-0003-9816-2808

Аннотация
Предложена конструкция устройства для перемещения чувствительного элемента (компрессионной трубки, цилиндра Фарадея или другого датчика) относительно атомарного или ионного пучка с целью измерения профиля его интенсивности. Устройство представляет собой двухосевой манипулятор с механической регулировкой, построенный по принципу вакуумного ввода движения с деформируемым уплотнительным элементом (металлическим сильфоном). Измерительная система, основанная на манипуляторе, успешно применена для построения профилей интенсивности пучков атомарной и ионной ступеней источника поляризованных ионов (POLarized Ion Source, POLIS). Измерения проводились в рамках эксперимента PolFusion, который направлен на изучение двойного поляризованного ядерного синтеза и осуществляется в Петербургском институте ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский Институт» — ПИЯФ).

Ключевые слова
ввод движения в вакуум, атомарный пучок, ионный пучок, цилиндр Фарадея, компрессионная трубка, спиновая ядерная поляризация, поляризованный ядерный синтез

Ссылка для цитирования: Васильев А.А., Вznуздаев М.Е., Ившин К.А., Киселев С.С., Соловьев А.Н., Фимушкин В.В. Двухосевой манипулятор для измерения профиля интенсивности атомарных и ионных пучков // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25, № 2. С. 366–372. doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-2-366-372

A two-axis manipulator for measuring the intensity profile of atomic and ionic beams

Alexander A. Vasilyev[1], Marat E. Vznuzdaev[2], Kuzma A. Ivshin[3], Sergey S. Kiselev[4]✉, Aleksandr N. Solovev[5], Victor V. Fimushkin[6]

[1,2] Petersburg Nuclear Physics Institute named by B.P. Konstantinov of National Research Centre “Kurchatov Institute”, Gatchina, 188300, Russian Federation
[2,4] ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation
[3,5,6] Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, 141980, Russian Federation

© Васильев А.А., Вznуздаев М.Е., Ившин К.А., Киселев С.С., Соловьев А.Н., Фимушкин В.В., 2025

[1] vasillie@gmail.com, https://orcid.org/0009-0002-5219-7215
[2] vznuzdaev_me@pnpi.nrcki.ru, https://orcid.org/0000-0003-4448-0539
[3] ivshin@jinr.ru, https://orcid.org/0000-0001-8403-0706
[4] sskiselev@itmo.ru✉, https://orcid.org/0009-0001-5464-4915
[5] solovev@jinr.ru, https://orcid.org/0000-0002-5355-5996
[6] fimushkin@jinr.ru, https://orcid.org/0009-0003-9816-2808

Abstract
A design for a device to move a sensitive element (compression tube, Faraday cylinder or other sensor) relative to an atomic or ionic beam to measure its intensity profile is described. The device is a two-axis manipulator with mechanical adjustment, built on the principle of vacuum motion input with a deformable sealing element (a metal bellows). The manipulator-based measurement system has successfully applied to measure the intensity profiles of beams from the atomic and ionic units of the POLIS polarized ion source. The measurements were conducted within the PolFusion experiment which is aimed at studying double-polarized nuclear fusion and is being carried out at the National Research Center "Kurchatov Institute" — PNPI.

Keywords
vacuum motion input, spin nuclear polarization, atomic beam, ion beam, Faraday cylinder, compression tube, polarized nuclear fusion

For citation: Vasilyev A.A., Vznuzdaev M.E., Ivshin K.A., Kiselev S.S., Solovev A.N., Fimushkin V.V. A two-axis manipulator for measuring the intensity profile of atomic and ionic beams. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2025, vol. 25, no. 2, pp. 366–372 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-2-366-372

Задача оптимизации пучка неизбежно возникает во всех ядерно-физических экспериментах, использующих ускорители заряженных частиц или струйные газовые мишени. Такая задача предусматривает наличие эффективного метода измерения характеристик пучка, в том числе профиля его интенсивности. Это необходимо как для коррекции настроек ускорителя при первоначальной проводке пучка, так и в процессе экспериментального сеанса [1, С. 7].

Эксперимент PolFusion [2] проводится в НИЦ «Курчатовский институт» — ПИЯФ и имеет своей целью прямое экспериментальное измерение дифференциального сечения реакции ^{2}H(d, p)^{3}H и ^{2}H(d, n)^{3}He с применением поляризованных пучка и струйной газовой мишени в диапазоне энергий до 100 кэВ. Основная задача этого эксперимента связана с одним из наиболее актуальных направлений современной ядерной физики — изучением спиновой ядерной поляризации и поляризованного ядерного синтеза [3]. Данные, полученные в эксперименте, заполнят пробел в знаниях об основных параметрах реакции поляризованного *dd*-синтеза и послужат основой для обоснования возможности использования поляризованного топлива в термоядерных реакторах.

В схеме эксперимента присутствуют два пересекающихся под прямым углом поляризованных пучка: ионный, состоящий из ядер дейтерия, производимый линейным источником POLarised Ion Source (POLIS) [4], и атомарный (газовая струя), выходящий из источника Atomic Beam Source (ABS). Для достижения поставленной цели эксперимента атомарный и ионный пучки должны быть проведены до центрального детектора таким образом, чтобы добиться их максимальной интенсивности в области столкновения частиц [5].

Ионный источник POLIS имеет в своем составе как атомарную ступень, в которой создается поток диссоциированного дейтерия, так и ионную, в которой происходит ионизация и ускорение частиц. Для достижения заданных параметров пучка необходима настройка атомарной и ионной ступеней, что требует построения профилей интенсивности данных пучков. Эта задача может быть решена применением чувствительных элементов — датчиков интенсивности атомарной струи и ионного пучка: компрессионной трубки [6] и цилиндра Фарадея [1, С. 13] соответственно. Оба чувствительных элемента производят сигнал, пропорциональный общему потоку частиц, попадающему в их апертуру. Следовательно, для построения профиля интенсивности необходимо иметь возможность перемещать чувствительный элемент относительно исследуемого пучка, производя измерения в разных позициях. Ранее такой подход был успешно применен для построения профиля интенсивности пучка источника атомарной струи ANKE ABS [7].

Для исследования структуры атомарных и ионных пучков в эксперименте PolFusion была создана измерительная система на основе двухосевого манипулятора с ручным приводом. Необходимость создания такой системы собственными силами была обусловлена отсутствием в продаже двухосевых (координатных) манипуляторов, имеющих подходящие массогабаритные характеристики, присоединительные размеры и прочие конструктивные особенности.

Конструкция системы предусматривает размещение на манипуляторе компрессионной трубки или цилиндра Фарадея с установкой всей сборки на одной из ступеней ионного источника POLIS таким образом, чтобы обеспечить перемещение этих чувствительных элементов в плоскости, перпендикулярной оси пучка.

В настоящей работе рассматривается конструкция и принцип действия двухосевого манипулятора, а также первые результаты использования измерительной системы, построенной на его основе, для измерения профилей интенсивности ионного и атомарного пучков.

Вакуумные вводы движения, в целом, можно разделить на три типа: с контактным уплотнением,

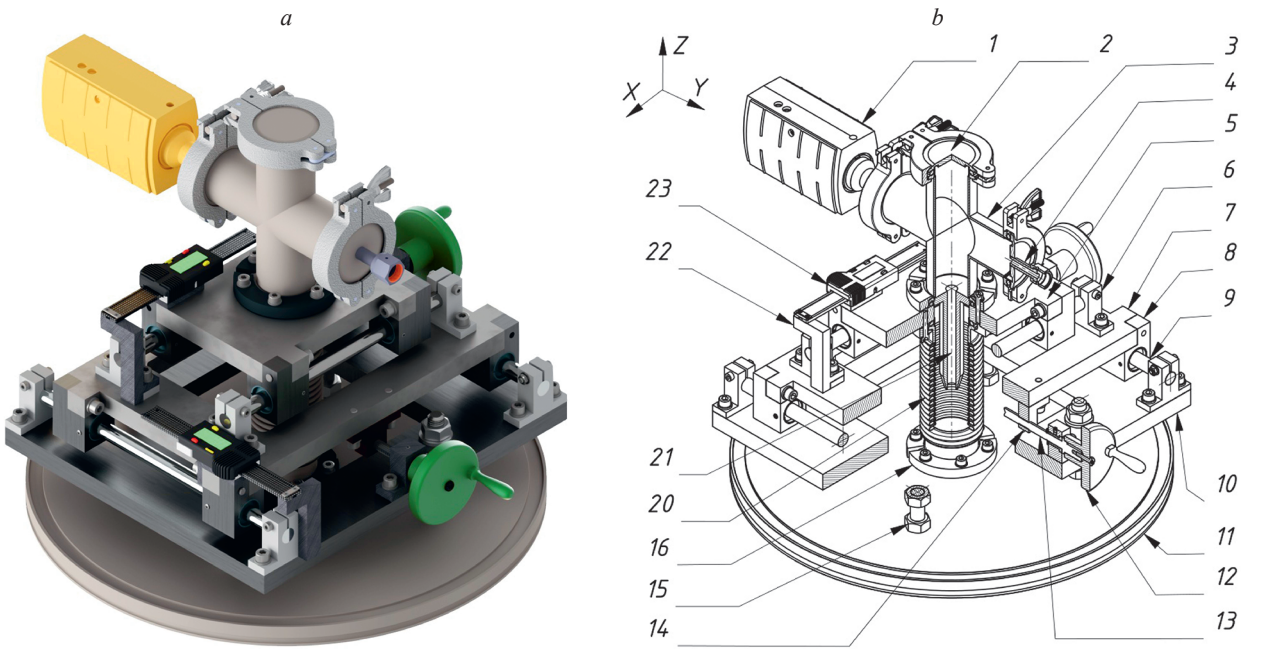

Рис. 1. Конструкция манипулятора: внешний вид (*a*) и схема (*b*).

1 — вакуумная лампа; *2* — заглушка; *3* — крестообразный вакуумный переходник; *4* — штуцер линии натекателя; *5* — пластина третьего яруса; *6* — опора концевая SH12; *7* — пластина второго яруса; *8* — линейный подшипник в обойме; *9* — цилиндрическая направляющая W12; *10* — пластина первого яруса; *11* — фланец; *12* — маховик; *13* — приводной винт; *14* — поводок; *15* — опорная шпилька; *16* — прижимной хомут; *20* — сильфон; *21* — компрессионная трубка; *22* — кронштейн энкодера; *23* — энкодер

Fig. 1. Manipulator design: external view (*a*) and schematic diagram (*b*).

1 — vacuum lamp; *2* — plug; *3* — cross-shaped vacuum adapter; *4* — inlet line fitting; *5* — third-tier plate; *6* — SH12 end support; *7* — second-tier plate; *8* — linear bearing in a housing; *9* — W12 cylindrical guide; *10* — first-tier plate; *11* — flange; *12* — handwheel; *13* — drive screw; *14* — drive link; *15* — support stud; *16* — clamping collar; *20* — bellows; *21* — compression tube; *22* — encoder bracket; *23* — encoder

с бесконтактным уплотнением и с деформируемым уплотнительным элементом [8, С. 7]. Рассматриваемое устройство относится к третьему типу, принцип его действия основан на использовании гибкого тонкостенного вакуумного сильфона.

На рис. 1 показан внешний вид двухосевого манипулятора и схема его устройства с обозначениями отдельных деталей.

Манипулятор смонтирован на стандартном фланце ISO-K250 *11*, который может быть установлен на выходе атомарной или ионной ступени источника POLIS. Внешний диаметр фланца (370 мм) определяет габариты устройства.

Система перемещения манипулятора имеет три яруса (*5*, *7*, *10*); каждый ярус представляет собой фрезерованную пластину толщиной 16 мм из сплава АМГ-6 с закрепленными на ней концевыми опорами типа SH12 *6* цилиндрических направляющих типа W12 *9* и обоймы линейных подшипников типа LM12UU DIN ISO 10285-2019[1] *8*. Ярус *10* жестко закреплен на фланце *11* с помощью четырех опорных шпилек М12 *15*.

Стандартный вакуумный сильфон KF-40 *20* номинальной длиной 150 мм герметично соединен с соответствующими отверстиями на фланце *11* и пластине яруса *5*; вакуумные соединения жестко зафиксированы прижимными хомутами *16*.

При необходимости сильфон может быть заменен на аналогичный меньшего стандартного размера, KF-25 или KF-16, путем применения адаптеров или замены пластин соответствующих ярусов.

Взаимное перемещение ярусов обеспечивается вручную двумя перпендикулярными приводными винтами М8 × 1 *13*, снабженными для удобства маховиками *12*. Максимальный диапазон хода как по оси *X*, так и по оси *Y* составляет 46 мм (±23 мм).

Чувствительный элемент, компрессионная трубка *21* или цилиндр Фарадея, монтируются в стандартный крестообразный вакуумный адаптер стандарта KF-40 *3*, который герметично крепится к пластине яруса *5*.

Для измерения смещения позиции датчика интенсивности пучка по каждой из осей применяются линейные энкодеры с жидкокристаллическими индикаторами *23*. Инструментальная погрешность измерения составляет ± 0,01 мм.

Измерение интенсивности пучков ионов и нейтральных частиц производится различными средствами.

Наиболее простым и точным способом определения интенсивности газовой струи является использование устройства с компрессионной трубкой [9, С. 56]. Принцип действия устройства показан на рис. 2, *a*. Оно состоит из калиброванного измерительного объе-

[1] DIN ISO 10285:2019-03. Rolling bearings — Sleeve type linear ball bearings — Boundary dimensions and tolerances (ISO 10285:2007+Amd. 1:2012). Deutsches Institut für Normung, 2019.

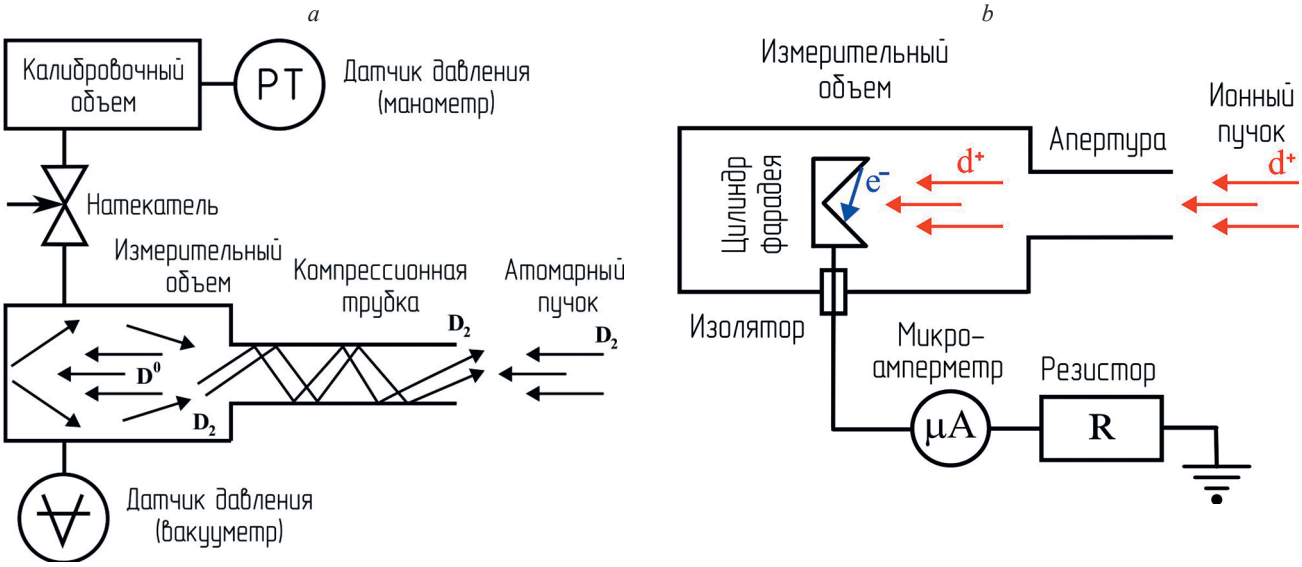

Рис. 2. Принципы действия устройств для измерения интенсивности ионного и атомарного пучков: компрессионная трубка для атомарного пучка (*a*); цилиндр Фарадея для ионного пучка (*b*).

PT — Pressure Transmitter (датчик давления), D^0 — атомарный дейтерий, D^2 — молекулярный дейтерий, e^- — электрон, d^+ — дейтрон

Fig. 2. Operating principles of devices for measuring the intensity of ion and atomic beams: Compression tube for atomic beam (*a*); Faraday cylinder for ion beam (*b*).

PT — Pressure Transmitter, D^0 — atomic deuterium, D^2 — molecular deuterium, e^- — electron, d^+ — deuteron

ма и трубки, присоединенной к нему и расположенной навстречу направлению пучка. В рассматриваемом устройстве применена трубка с внутренним диаметром 5 мм и длиной 100 мм; функцию измерительного объема выполняет крестообразный адаптер стандарта KF-40.

Измерение интенсивности атомарного пучка производится по давлению в измерительном объеме. Величина этого давления определяется соотношением между потоком атомов, попадающих внутрь измерительного объема через компрессионную трубку, и потока рекомбинированных молекул, выходящего из этого объема через ту же трубку в свободномолекулярном режиме [10].

В качестве измерительного прибора используется вакуумная лампа *1* (рис. 1) с горячим катодом. Воспроизводимость датчика такого типа составляет приблизительно 2 %, в то время как погрешность его показаний достигает величины 15–20 %. Соответственно, итоговая точность измерений, полученных с помощью компрессионной трубки, должна быть обеспечена дополнительной калибровкой. Для выполнения калибровки устройство снабжено вентилем тонкой регулировки (натекателем) и калибровочным объемом с прецизионным датчиком давления, которые обеспечивают поступление калибровочного газа в измерительный объем с точно заданной скоростью.

Цилиндр Фарадея — устройство (рис. 2, *b*), предназначенное для измерения интенсивности пучка заряженных частиц в вакууме. Работа цилиндра Фарадея построена на кулонометрическом принципе. Основная деталь устройства — чувствительная ячейка, которая имеет вогнутую форму для обеспечения сбора вторичных электронов, выбитых измеряемым пучком. Сталкиваясь с металлической поверхностью ячейки, ионы пучка теряют свой заряд и передают его металлу. Ячейка приобретает заряд, соответствующий по знаку заряду частиц пучка. Если цилиндр Фарадея включен в электрическую цепь с проводником, находящимся под нулевым потенциалом, между цилиндром и проводником возникает электрический ток, пропорциональный интенсивности пучка. Полученный ток может быть измерен прецизионным микроамперметром.

Двухосевой манипулятор был применен для измерения профилей интенсивности атомарного и ионного пучков дейтерия, производимых основными атомарной и ионной ступенями источника поляризованных ионов POLIS. Для измерений использовались компрессионная трубка в случае атомарного пучка и цилиндр Фарадея в случае ионного. Сборка манипулятора с измерительным устройством устанавливалась на фланцах соответствующих ступеней, таким образом измерялись выходные интенсивности пучков. На рис. 3 приведены результаты измерений. Графики относятся к перемещению измерительных пучков в плоскости пучка, перпендикулярной его оси.

В результате создано устройство двухосевого перемещения (манипулятор) для компрессионной трубки, цилиндра Фарадея или другого устройства (например, чувствительный элемент квадрупольного масс-спектрометра). Манипулятор успешно применен для измерения профилей интенсивности атомарного и ионного пучков экспериментальной установки PolFusion.

Полученные экспериментальные данные использованы для настройки параметров атомарного и ионного источников.

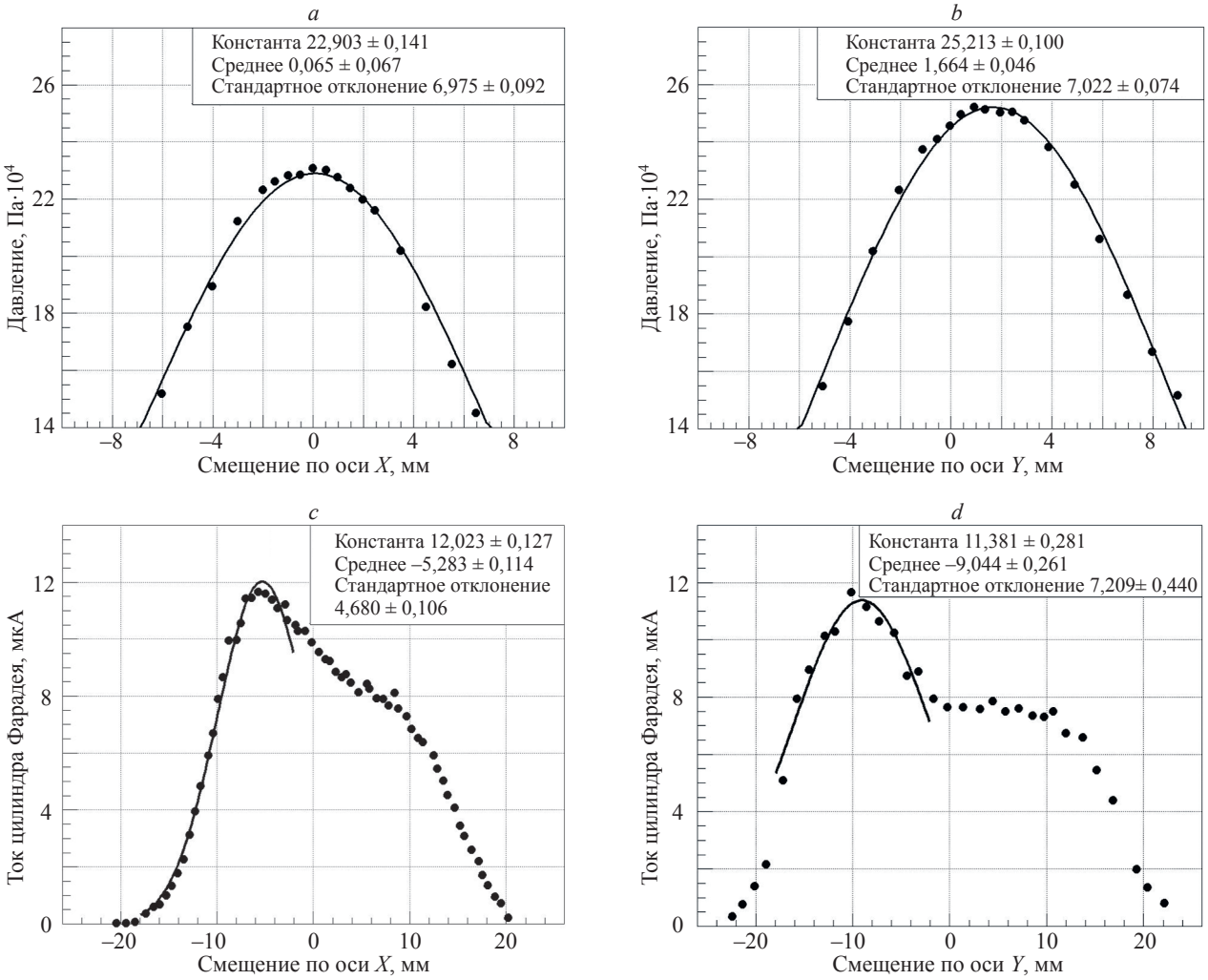

Рис. 3. Результаты измерений интенсивностей пучков атомов (*a*, *b*) и ионов (*c*, *d*) дейтерия, произведенных посредством компрессионной трубки (*a*, *b*) и цилиндра Фарадея (*c*, *d*) при прямолинейном их перемещении через геометрический центр вакуумного тракта атомарной и ионной ступеней источника POLIS: смещения вдоль оси *X* (*a*, *c*) и *Y* (*b*, *d*).

Сплошная линия — аппроксимация функцией нормального распределения Гаусса. Нулевое смещение соответствует геометрическому центру пучкового тракта. На легенде приведены значения параметров аппроксимирующей функции: константа, среднее, стандартное отклонение

Fig. 3. Results of measurements of the deuterium atom intensities (*a*, *b*) and ion (*c*, *d*) beams produced using a compression tube (*a*, *b*) and a Faraday cup (*c*, *d*) during their rectilinear movement through the geometric center of the vacuum path of the atomic and ion stages of the POLIS source.

Displacements along the *X* (*a*, *c*) and *Y* (*b*, *d*) axes. The solid line represents the approximation by a Gaussian normal distribution function. Zero displacement corresponds to the geometric center of the beam tract. The legend provides the values of the approximating function parameters: constant, mean, standard deviation

Конструкция манипулятора основана на применении доступных стандартных элементов (сильфон, направляющие, концевые опоры), нестандартные детали предельно технологичны.

Устройство может быть адаптировано для размещения на вакуумных соединениях различного типа путем минимальных переделок.

Манипулятор пригоден для применения в широком круге задач, связанных с контролем свойств ионных и атомарных пучков различной природы, а также в других приложениях, требующих прецизионного ввода движения в вакуум.

Литература

1. Смалюк В.В. Диагностика пучков заряженных частиц в ускорителях. Новосибирск: Параллель, 2009. 293 с.
2. Andreyanov A., Fotyev V., Ivshin K., Kochenda L., Kravchenko P., Kravtsov P., Larionov V., Mikirtychyants S., Rozhdestvensky A., Solovev A., Solovyev I., Trofimov V., Vasilyev A., Vznuzdaev M. Study of ^{2}H(d, p)^{3}H and ^{2}H(d, n)^{3}He nuclear reactions with polarized deuteron beams. PolFusion experiment // Physics of Atomic Nuclei. 2021. V. 84. N 11. P. 1895–1899. https://doi.org/10.1134/s1063778821100033
3. Schieck H.P.G. The status of «polarized fusion» // The European Physical Journal A. 2010. V 44. N 2. P. 321–354. https://doi.org/10.1140/epja/i2010-10964-4
4. Kremers H.R., Drentje A.G. Performance of the polarized ion source POLIS used at the AGOR accelerator facility // AIP Conference Proceedings. 1998. V. 421. N 1. P. 507–508. https://doi.org/10.1063/1.54980
5. Solovev A., Andreyanov A., Barion L., Ciullo G., Engels R., Fotyev V., Ivshin K., Kochenda L., Kravchenko P., Kravtsov P., Larionov V., Rozhdestvensky A., Sherman S., Solovyev I., Trofimov V., Vasilyev A., Vznuzdaev M. Optimization and first tests of the experimental setup to investigate the double-polarized DD-fusion reactions // Journal of Instrumentation. 2020. V. 15. N 8. P. C08003. https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/08/c08003
6. Терехин С.Н., Васильев А.А., Микиртычьянц М.С., Кравцов П.А., Взнуздаев М.Е. Источник поляризованных атомов дейтерия для эксперимента PolFusion // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. Т. 79. № 3. С. 109–114.
7. Brüggemann R., Emmerich R., Engels R., Kleines H., Koptev V., Kravtsov P., Lemaître S., Ley J., Lorentz B., Lorenz S., Mikirtytchiants M., Nekipelov M., Nelyubin V., Schieck H.P.G., Rathmann F., Sarkadi J., Seyfarth H., Steffens E., Ströher H., Vassiliev A., Zwoll K. The polarized internal gas target for ANKE at COSY-Jülich // AIP Conference Proceedings. 2001. V. 570. P. 830–834. https://doi.org/10.1063/1.1384173
8. Медников М.И. Вводы движения в вакуум. М.: Машиностроение, 1974. 182 с.
9. Григорьев К.Ю. Создание поляризованной водороднодейтериевой газовой мишени для эксперимента ANKE на внутреннем пучке накопительного кольца ускорителя COSY: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Российская академия наук, С.-Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова. Гатчина, 2007. 119 с.
10. Mikirtychyants M., Engels R., Grigoryev K., Kleines H., Kravtsov P., Lorenz S., Nekipelov M., Nelyubin V., Rathmann F., Sarkadi J., Schieck H.P.G., Seyfarth H., Steffens E., Ströher H., Vasilyev A. The polarized H and D atomic beam source for ANKE at COSY-Julich // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2013. V. 721. P. 83–98. https://doi.org/10.1016/j.nima.2013.03.043

References

1. Smaliuk V.V. *Diagnostics of Charged Particle Beams in Accelerators*. Novosibirsk, Parallel' Publ., 2009, 293 p. (in Russian)
2. Andreyanov A., Fotyev V., Ivshin K., Kochenda L., Kravchenko P., Kravtsov P., Larionov V., Mikirtychyants S., Rozhdestvensky A., Solovev A., Solovyev I., Trofimov V., Vasilyev A., Vznuzdaev M. Study of ^{2}H(d, p)^{3}H and ^{2}H(d, n)^{3}He nuclear reactions with polarized deuteron beams. PolFusion experiment. *Physics of Atomic Nuclei*, 2021, vol. 84, no. 11, pp. 1895–1899. https://doi.org/10.1134/s1063778821100033
3. Schieck H.P.G. The status of «polarized fusion». *The European Physical Journal A*, 2010, vol. 44, no. 2, pp. 321–354. https://doi.org/10.1140/epja/i2010-10964-4
4. Kremers H.R., Drentje A.G. Performance of the polarized ion source POLIS used at the AGOR accelerator facility. *AIP Conference Proceedings*, 1998, vol. 421, no. 1, pp. 507–508. https://doi.org/10.1063/1.54980
5. Solovev A., Andreyanov A., Barion L., Ciullo G., Engels R., Fotyev V., Ivshin K., Kochenda L., Kravchenko P., Kravtsov P., Larionov V., Rozhdestvensky A., Sherman S., Solovyev I., Trofimov V., Vasilyev A., Vznuzdaev M. Optimization and first tests of the experimental setup to investigate the double-polarized DD-fusion reactions. *Journal of Instrumentation*, 2020, vol. 15, no. 8, pp. C08003. https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/08/c08003
6. Terekhin S.N., Vasiliev A.A., Mikirtychyants M., Kravtsov P.A., Vznuzdaev M.E. Polarized atomic beam source for PolFusion experiment. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2012, vol. 79, no. 3, pp. 109–114. (in Russian)
7. Brüggemann R., Emmerich R., Engels R., Kleines H., Koptev V., Kravtsov P., Lemaître S., Ley J., Lorentz B., Lorenz S., Mikirtytchiants M., Nekipelov M., Nelyubin V., Schieck H.P.G., Rathmann F., Sarkadi J., Seyfarth H., Steffens E., Ströher H., Vassiliev A., Zwoll K. The polarized internal gas target for ANKE at COSY-Jülich. *AIP Conference Proceedings*, 2001, vol. 570, pp. 830–834. https://doi.org/10.1063/1.1384173
8. Mednikov M.I. *Feed-throughs to Move into the Vacuum*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1974, 182 p. (in Russian)
9. Grigorev K.Iu. *Creation of a polarized hydrogen-deuterium gas target for the ANKE experiment on the inner beam of the COSY accelerator storage ring.* Dissertation for the degree of doctor of technical sciences. Gatchina, 2007, 119 p. (in Russian)
10. Mikirtychyants M., Engels R., Grigoryev K., Kleines H., Kravtsov P., Lorenz S., Nekipelov M., Nelyubin V., Rathmann F., Sarkadi J., Schieck H.P.G., Seyfarth H., Steffens E., Ströher H., Vasilyev A. The polarized H and D atomic beam source for ANKE at COSY-Julich. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2013, vol. 721, pp. 83–98. https://doi.org/10.1016/j.nima.2013.03.043

Авторы

Васильев Александр Анатольевич — кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией, Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Гатчина, 188300, Российская Федерация, sc 57220113105, https://orcid.org/0009-0002-5219-7215, vasillie@gmail.com

Взнуздаев Марат Евгеньевич — кандидат химических наук, заведующий отделом, Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Гатчина, 188300, Российская Федерация; ведущий инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, sc 8347828900, https://orcid.org/0000-0003-4448-0539, vznuzdaev_me@pnpi.nrcki.ru

Ившин Кузьма Александрович — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, 141980, Российская Федерация, sc 56994011900, https://orcid.org/0000-0001-8403-0706, ivshin@jinr.ru

Киселев Сергей Степанович — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, https://orcid.org/0009-0001-5464-4915, sskiselev@itmo.ru

Authors

Alexander A. Vasilyev — PhD (Physics & Mathematics), Head of Laboratory, Petersburg Nuclear Physics Institute named by B.P. Konstantinov of National Research Centre "Kurchatov Institute", Gatchina, 188300, Russian Federation, sc 57220113105, https://orcid.org/0009-0002-5219-7215, vasillie@gmail.com

Marat E. Vznuzdaev — PhD (Chemistry), Head of Department, Petersburg Nuclear Physics Institute named by B.P. Konstantinov of National Research Centre "Kurchatov Institute", Gatchina, 188300, Russian Federation; Leading Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, sc 8347828900, https://orcid.org/0000-0003-4448-0539, vznuzdaev_me@pnpi.nrcki.ru

Kuzma A. Ivshin — PhD (Physics & Mathematics), Senior Researcher, Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, 141980, Russian Federation, sc 56994011900, https://orcid.org/0000-0001-8403-0706, ivshin@jinr.ru

Sergey S. Kiselev — PhD, Senior Researcher, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, https://orcid.org/0009-0001-5464-4915, sskiselev@itmo.ru

Соловьев Александр Николаевич — старший научный сотрудник, Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, 141980, Российская Федерация, SC 57218669665, https://orcid.org/0000-0002-5355-5996, solovev@jinr.ru
Фимушкин Виктор Васильевич — старший научный сотрудник, Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, 141980, Российская Федерация, SC 6507118905, https://orcid.org/0009-0003-9816-2808, fimushkin@jinr.ru

Aleksandr N. Solovev — Senior Researcher, Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, 141980, Russian Federation, SC 57218669665, https://orcid.org/0000-0002-5355-5996, solovev@jinr.ru

Victor V. Fimushkin — Senior Researcher, Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, 141980, Russian Federation, SC 6507118905, https://orcid.org/0009-0003-9816-2808, fimushkin@jinr.ru

Статья поступила в редакцию 10.12.2024
Одобрена после рецензирования 27.02.2025
Принята к печати 20.03.2025

Received 10.12.2024
Approved after reviewing 27.02.2025
Accepted 20.03.2025

Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»