

ИЗМЕРЕНИЕ ТОКА ПУЧКА ИОНОВ АРГОНА, СОПУТСТВУЮЩЕГО ПУЧКУ ПРОТОНОВ, В УСКОРИТЕЛЕ-ТАНДЕМЕ С ВАКУУМНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

© 2021 г. Я. А. Колесников^{a,b,*}, Г. М. Остринов^a, П. Д. Пономарев^a,
С. С. Савинов^a, С. Ю. Таскаев^{a,b,**}, И. М. Щудло^{a,b}

^a Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11

^b Новосибирский государственный университет
Россия, 630090 Новосибирск, ул. Пирогова, 2

*e-mail: Ya.A.Kolesnikov@inp.nsk.su

**e-mail: taskaev@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 12.02.2021 г.

После доработки 09.03.2021 г.

Принята к публикации 19.03.2021 г.

В электростатических тандемных ускорителях заряженных частиц для конверсии отрицательных ионов в положительные используют газовые обдирочные мишени. Частичная ионизация газа ионами приводит к формированию в ускорительных каналах нежелательного пучка ионов обдирочного газа. В данной работе методом масс-спектропии измерен ток пучка ионов аргона, образующихся в ускорителе-тандеме с вакуумной изоляцией. Показано, что ток ионов аргона в 2000 раз меньше тока пучка протонов. Достоверность измерения обеспечена визуализацией пучка ионов аргона на поверхности литиевой мишени, а также подтверждена экспериментом с повышенным газонапуском и оценкой возможного вклада пучка протонов. Показано, что столь малая величина тока ионов аргона не представляет опасности ни в качестве источника дополнительного нагрева литиевой мишени, ни в качестве дополнительной нагрузки высоковольтного источника питания и потому не требует реализации предложенных ранее средств для его подавления.

DOI: 10.31857/S0032816221040194

Ускорители заряженных частиц широко используются в научных исследованиях, медицине и других приложениях. Тандемные ускорители – это высоковольтные электростатические ускорители, в которых высоковольтный потенциал используется дважды: сначала для ускорения отрицательных ионов, а затем, после смены полярности их заряда в высоковольтном терминале, ускорения положительных ионов. Для конверсии заряда ионов используют тонкие фольги или – при большем токе ионов – газовые обдирочные мишени, аналогичные аргоновой мишени в тандемном ускорителе Института ядерной физики СО РАН. Газовая обдирочная мишень обеспечивает эффективную обдирку пучка отрицательных ионов, но ее применение приводит к формированию нежелательного пучка ионов аргона, образующихся в обдирочной мишени в результате ионизации аргона пучком ионов и проникающих в ускорительный канал.

Цель данной работы – измерение тока пучка ионов аргона в ускорителе-тандеме с вакуумной изоляцией.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Исследования проведены на ускорительном источнике нейтронов Института ядерной физики СО РАН (Новосибирск, Россия). Схема источника представлена на рис. 1, а его подробное описание приведено в работе [1]. Для получения стационарного пучка протонов с энергией от 0.6 до 2.3 МэВ и током от 0.3 до 10 мА использован ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией – тандемный ускоритель заряженных частиц с оригинальной конструкцией электродов. В нем, в отличие от традиционных ускорителей, нет ускорительных трубок, высоковольтный электрод и электроды с промежуточным потенциалом вложены друг в друга и закреплены на одиночном проходном изоляторе, как показано на рис. 1. Такая конфигурация ускорителя позволила улучшить высоко-

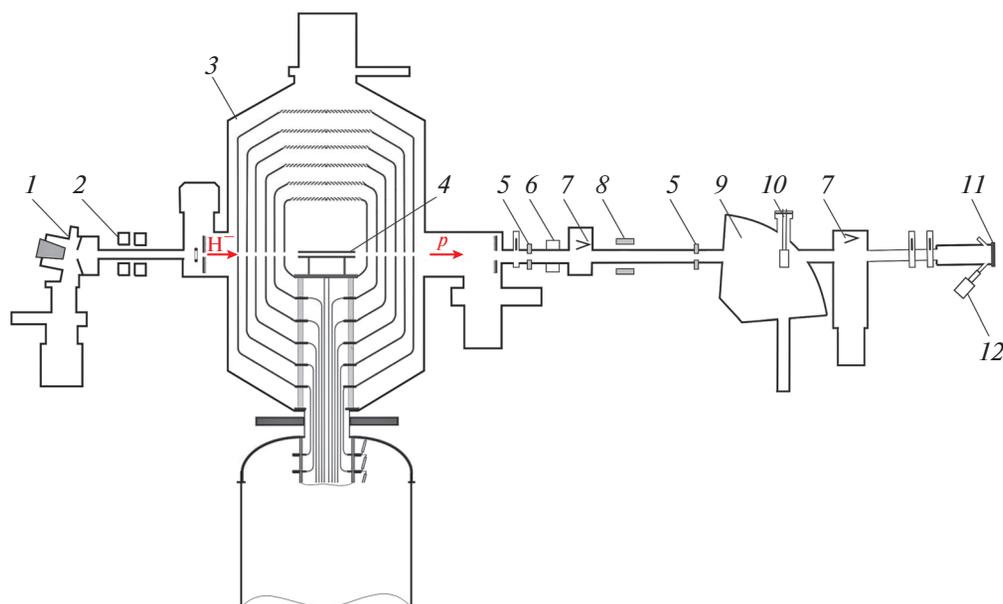


Рис. 1. Схема ускорительного источника эпитепловых нейтронов. 1 – источник отрицательных ионов водорода, 2 – магнитная линза, 3 – ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией, 4 – газовая обдирочная мишень, 5 – охлаждаемая диафрагма, 6 – бесконтактный датчик тока Bergoz (Франция), 7 – вводимые цилиндры Фарадея, 8 – корректор, 9 – поворотный магнит, 10 – охлаждаемый приемник пучка с диафрагмой, 11 – литиевая мишень, 12 – видеокамера Hikvision (Китай).

вольтовую прочность ускорительных зазоров и, как следствие, увеличить ток протонов.

Одним из основных элементов тандемного ускорителя является обдирочная мишень 4, размещаемая внутри высоковольтного терминала. Она обеспечивает конверсию отрицательных ионов водорода в протоны с высокой эффективностью, обычно на уровне 95%. Мишень представляет собой охлаждаемую цилиндрическую медную трубку длиной 400 мм с диаметром внутреннего отверстия 16 мм [1]. Взаимодействие пучка ионов водорода с газовой мишенью приводит к ее частичной ионизации, и внутри обдирочной трубки образуется слабоионизованная плазма. Поскольку электроны более подвижны, чем ионы аргона, для сохранения квазинейтральности плазма принимает положительный потенциал. Под действием положительного потенциала часть ионов аргона выходит из обдирочной трубки, попадает в ускорительный канал и формирует пучок ионов аргона. Простые оценки тока ионов аргона дают значения от соизмеримых до пренебрежимо малых по сравнению с током протонов величин. Достоверно оценить величину тока ионов аргона сложно из-за: неоднородности конвертируемого пучка и вторичной плазмы вдоль мишени, возможности развития пучково-плазменной неустойчивости, проникновения электрического поля ускоряющих зазоров внутрь высоковольтного терминала и множества других параметров, которые достоверно не известны.

Для подавления проникновения ионов аргона в ускорительные зазоры предложено размещать перед и после обдирочной мишени металлические кольца под отрицательным или положительным потенциалом либо отклонять пучок ионов магнитным полем внутри высоковольтного терминала [2].

На формирование пучка ионов аргона указывали два экспериментальных факта. Во-первых, ранее кольцевым детектором был измерен ток вторичных ионов, текущий по периферии навстречу ускоряемому пучку отрицательных ионов водорода [3]. Возможно, вклад в этот ток дают и ионы аргона, вытекающие из обдирочной мишени. Однако более вероятно, что основной вклад в этот ток дают положительные ионы, образовавшиеся в ускорительных зазорах в результате ионизации пучком ионов водорода остаточного или обдирочного газа. При этом положительные ионы образуются в основном в первом ускорительном зазоре из-за его протяженности и высокого сечения ионизации при относительно малой скорости отрицательных ионов водорода. Во-вторых, при изучении радиационного блистеринга металлов при имплантации протонов с энергией 2 МэВ [4] наблюдалось более раннее образование блистеров меньшего, чем ожидалось, размера от имплантации протонов. Данный эффект был объяснен наличием пучка ионов аргона с энергией 1 МэВ – они проникают в металл на меньшую глубину, чем протоны, и могут быстрее деформи-

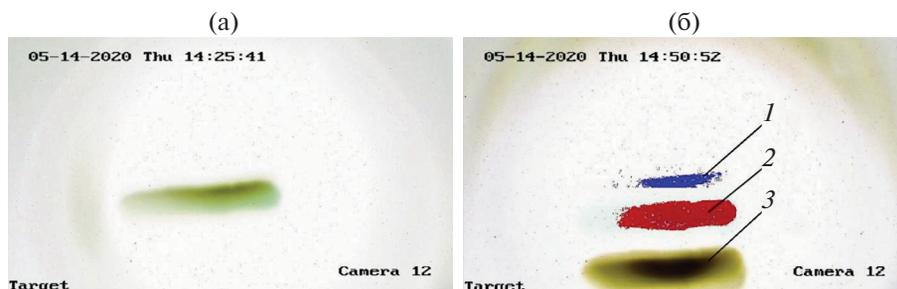


Рис. 2. Изображения с видеокамеры, смотрящей на поверхность литиевой мишени, при токе поворотного магнита 0 А (а), 14 А (б). 1 – свечение, вызванное нейтралами (атомами водорода), 2 – ионами аргона, 3 – протонами.

ровать поверхность металла блистерами меньшего размера.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

Измерения проведены при токе пучка протонов 760 ± 10 мкА, энергии 1.850 ± 0.002 МэВ, поперечном размере пучка порядка 1 см.

Для измерения тока ионов аргона применен метод масс-спектропии. Внутрь поворотного магнита 9 (см. рис. 1) вставлена охлаждаемая диафрагма 10 с щелью 5×20 мм. Поскольку масса иона аргона в 40 раз больше массы протона, а кинетическая энергия в два раза меньше, то ларморовский радиус иона в магнитном поле в $\sqrt{20}$ раз меньше ларморовского радиуса протона, и поворотный магнит будет отклонять ионы аргона на угол, в $\sqrt{20}$ раз меньший, чем угол отклонения протонов. Разделение компонент пучка ионов отчетливо видно на поверхности литиевой мишени, когда взаимодействие ионов с литием приводит к люминесценции, регистрируемой видеокамерой 12 [5]. На рис. 2 приведены два примера изображения видеокамеры: без магнитного поля и с магнитным полем. Видно, что включение магнитного поля разделяет пучок на три компоненты: поток нейтралов 1, пучок ионов аргона 2 и пучок протонов 3.

Сценарий измерения тока ионов аргона состоял в том, чтобы, разместив диафрагму ниже оси ускорителя, магнитным полем поворотного магнита направить в отверстие диафрагмы пучок ионов аргона, а пучок протонов отклонить ниже, как показано на рис. 3. Действительно, при токе 68.5 А в катушке поворотного магнита через диафрагму проходит только пучок ионов аргона, который, попадая на литиевую мишень, вызывает характерную люминесценцию, регистрируемую видеокамерой. Согласно рис. 4, при токе 10 А в катушке поворотного магнита на поверхности литиевой мишени визуально видны пучок аргона и пучок протонов, а при токе 68.5 А пучка прото-

нов нет – видны только пучки ионов аргона и нейтралов.

В таком режиме при токе 68.5 А измерен ток заряженных частиц, проходящих через отверстие в диафрагме и попадающих на поверхность литиевой мишени; он составил 150 ± 70 нА. Ток измерен омическим делителем напряжения, подключенным к мишенному узлу (11 на рис. 1), электрически изолированному от установки. Если бы не визуализация пучка ионов аргона по его люминесценции на поверхности литиевой мишени, то столь малую величину регистрируемого тока можно было бы ошибочно посчитать за шум.

Полученный результат оказался неожиданным, поскольку ранее предполагали, что ток ионов аргона, конечно, меньше тока протонов, но не настолько. Так как максимальный ток протонов, проходимый через щелевое отверстие диафрагмы, равен 286 ± 3 мкА, то, полагая размеры пучков ионов аргона и протонов равными, получим, что ток ионов аргона в 2000 раз меньше тока протонов. Этот результат является основным результатом проведенного исследования.

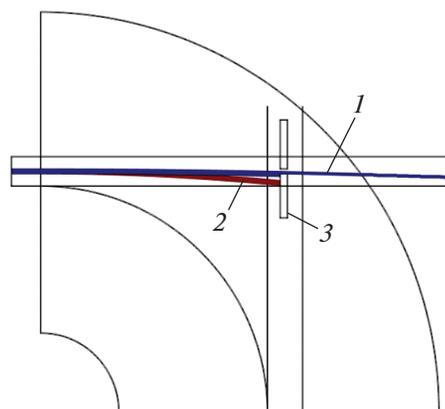


Рис. 3. Результат моделирования траектории пучка ионов аргона (1) и пучка протонов (2) в поворотном магните при токе в катушке магнита 68.5 А. Охлаждаемая диафрагма 3 размещена на 12 мм ниже оси ускорителя.

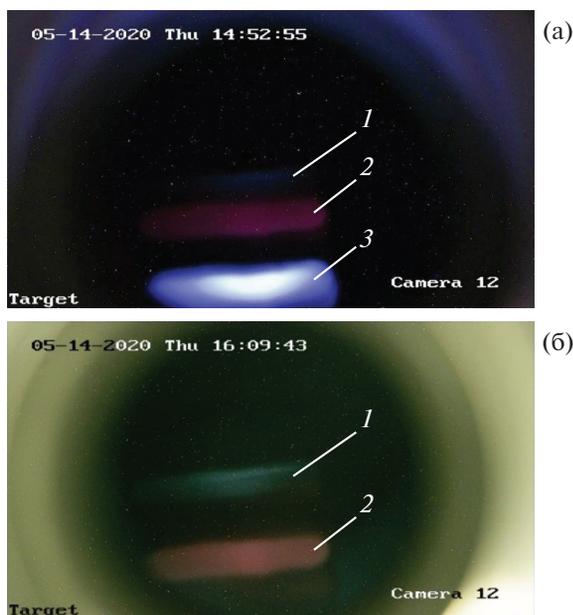


Рис. 4. Изображения с видеокamеры, смотрящей на поверхность литиевой мишени: **а** – при токе в катушке поворотного магнита 10 А, **б** – 68.5 А. 1 – пучок нейтральных атомов, 2 – пучок аргонов, 3 – пучок протонов.

При такой величине ток пучка ионов аргона не представляет опасности ни в качестве источника дополнительного нагрева литиевой мишени, ни как дополнительная нагрузка высоковольтного источника питания и потому не требует реализации средств для его подавления.

Достоверность полученного результата подтвердим дополнительным экспериментом и оценкой.

С этой целью увеличим в два раза частоту открывания клапана, подающего аргон в обдирочную мишень. Большая подача обдирочного газа, как и должно быть, приводит к увеличению тока ионов аргона до 670 ± 150 нА и более интенсивной люминесценции, что видно из сравнения изображений на рис. 4б и рис. 5. Также большая подача газа приводит к лучшей обдирке пучка отрицательных ионов водорода, что влечет за собой уменьшение потока нейтралов, видимое из сравнения изображений на рис. 4б и рис. 5. Обратим внимание на то, что двукратное увеличение подачи аргона в обдирочную мишень приводит к почти четырехкратному возрастанию тока ионов аргона, что возможно, поскольку истечение ионов из обдирочной мишени зависит от многих процессов и параметров. Но даже в этом случае ток пучка ионов аргона очень мал по сравнению с током протонов.

Оценим вклад протонов в измеренную величину 150 ± 70 нА. Для этого необходимо определить профиль пучка протонов, что является слож-

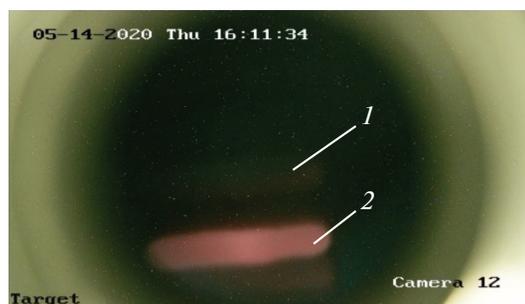


Рис. 5. Свечение аргонового пучка (1) и пучка нейтральных атомов (2), вызванное люминесценцией литиевого слоя мишени при двукратном увеличении потока аргона в обдирочной мишени.

ной задачей, принимая во внимание большую мощность пучка протонов. До проведения данного исследования было выполнено только одно измерение профиля пучка протонов достаточно экзотическим способом – по распространению границы образования блистеров с увеличением флюенса протонов, имплантированных в медь [4]. Поперечный размер пучка протонов оценили в 1 см; это значение принимали в расчет при разработке методики измерения тока ионов аргона.

Изменяя ток катушки поворотного магнита, проведем сканирование пучка заряженных частиц. Результат измерений – фактически результат хордовых измерений пучка протонов – представлен на рис. 6. Здесь по оси абсцисс отложено пересчитанное для протонов поперечное смещение. Впишем в измеренную зависимость тока протонов от величины магнитного поля распределение Гаусса. Экстраполируя вписанное распределение Гаусса на координату 28 мм, соответствующую току 68.5 А в катушке поворотного магнита, получим, что в измеренную величину 150 ± 70 нА протоны могут давать вклад, равный 19 нА. Реально этот вклад существенно меньше, так как на периферии плотность тока протонов спадает быстрее, чем распределение Гаусса, что видно на рис. 6. Это обусловлено сильной фокусировкой пучка отрицательных ионов водорода в ускорителе, действием пространственного заряда [6] и малым размером отверстий в ускоряющих электродах ускорителя. Некоторое отличие профиля тока от распределения Гаусса в приосевой области пучка протонов, ранее обнаруженное [4] и неприципиальное для полученного результата, обусловлено искажением электрического поля в ускорителе из-за несоосности электродов и неидеальности их формы.

Хордовые измерения профиля пучка протонов позволяют восстановить его профиль. Полагая

распределение гауссовым:
$$j(r) = \frac{j_0}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2}},$$

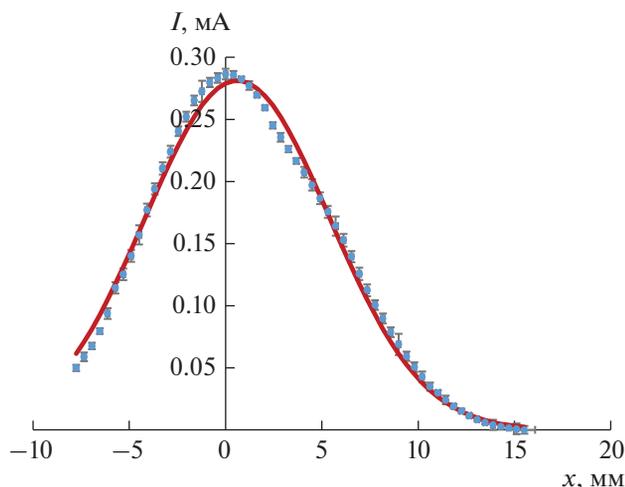


Рис. 6. Зависимость тока пучка протонов, прошедших через щель, от их отклонения на приемнике пучка (точки с погрешностями) и гауссово распределение, аппроксимирующее зависимость (сплошная линия).

методом наименьших квадратов находим, что среднеквадратичное отклонение $\sigma = 4.8$ мм, смещение $x_0 = 0.61$ мм, ширина пучка протонов на высоте $1/e$ равна 13 мм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В Институте ядерной физики СО РАН функционирует ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией, в котором для обдирки пучка отрицательных ионов водорода в протоны используют газовую аргоновую обдирочную мишень. Взаимодействие пучка ионов с обдирочным газом приводит к частичной ионизации аргона, проникновению ионов аргона в ускорительный канал и формированию ускоренного пучка ионов аргона, сопутствующего пучку протонов.

Методом масс-спектропии с применением поворотного магнита и охлаждаемой диафрагмы

измерена величина тока пучка ионов аргона; она в 2000 раз меньше тока пучка протонов. Достоверность измерения обеспечена визуализацией пучка ионов аргона на поверхности литиевой мишени, подтверждена экспериментом с повышенным газонапуском и оценкой возможного вклада пучка протонов. Столь малая величина тока пучка ионов аргона не представляет опасности ни в качестве дополнительного нагрева литиевой мишени, ни в качестве дополнительной нагрузки высоковольтного источника питания и потому не требует реализации предложенных ранее средств подавления.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-32-90118.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Таскаев С.Ю.* // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 2015. Т. 46. № 6. С. 1770.
2. *Makarov A., Ostreinov Yu., Taskaev S., Vobly P.* // Applied Radiation and Isotopes. 2015. V. 106. P. 53. doi 0969-8043 <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2015.07.046>
3. *Ivanov A., Kasatov D., Koshkarev A., Makarov A., Ostreinov Yu., Shchudlo I., Sorokin I., Taskaev S.* // JINST. 2016. V. 11. P04018. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/11/04/P04018>
4. *Badrutdinov A., Bykov T., Gromilov S., Higashi Y., Kasatov D., Kolesnikov I., Koshkarev A., Makarov A., Miyazawa T., Shchudlo I., Sokolova E., Sugawara H., Taskaev S.* // Metals. 2017. V. 7. Issue 12. P. 558. <https://doi.org/10.3390/met7120558>
5. *Макаров А.Н., Соколова Е.О., Таскаев С.Ю.* // ПТЭ. 2021. № 1. С. 30. <https://doi.org/10.31857/S0032816220060233>
6. *Быков Т.А., Касатов Д.А., Колесников Я.А., Кошкарёв А.М., Макаров А.Н., Остреинов Ю.М., Соколова Е.О., Сорокин И.Н., Таскаев С.Ю., Шудло И.М.* // ПТЭ. 2018. № 5. С. 90. <https://doi.org/10.1134/S003281621805018X>