

Источник ленточного пучка ионов на основе модифицированной ловушки Пеннинга с квадрупольным магнитным полем

© С.Г. Константинов, В.Ф. Скляров, И.Н. Чуркин, И.В. Шиховцев

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

E-mail: V.F.Sklyarov@inp.nsk.su

Поступило в Редакцию 12 мая 2026 г.

В окончательной редакции 1 июля 2026 г.

Принято к публикации 1 июля 2026 г.

Описывается источник ленточного ионного пучка на основе модифицированной ловушки Пеннинга с касповой конфигурацией силовых линий магнитного поля. Данный источник ионов позволяет получать пучок размером около 2×50 mm. Основные цели исследования состояли в обеспечении высокой равномерности распределения плотности ионного тока вдоль ширины пучка и достижении высокой временной стабильности параметров разряда. Экспериментально подтверждена возможность получения ленточного пучка ионов аргона с линейной плотностью тока порядка 10 mA/cm при энергии ионов 10 keV.

Ключевые слова: ионный источник, ловушка Пеннинга с касповым магнитным полем, диагностика ленточных пучков, измерение тока пучка.

DOI: DOI: 10.21883/00000000000

Ионные пучки широко применяются в корпускулярных диагностиках термоядерной плазмы [1,2]. В свою очередь использование ленточных пучков позволяет проводить многохордовые измерения без необходимости сооружения нескольких отдельных ионных инжекторов. В области модификации материалов ионные пучки используются для создания и обработки экранов дисплеев [3] и полупроводниковых пластин [4]. При этом существенной особенностью использования ленточных пучков (по сравнению с точечными пучками) является возможность получения большего полного тока ввиду более высокого предела по пространственному заряду. Высокая продольная однородность плотности ионного тока существенно упрощает систему развертки при имплантационной обработке. Для обсуждаемых задач требуемая плотность тока пучка, как правило, лежит в достаточно широком диапазоне: от 0.1 до 10 mA/cm². Нижний предел обычно обусловлен чувствительностью регистрирующей аппаратуры, а верхний — предельно допустимой падающей мощностью.

В настоящее время в имплантерах преимущественно используются ионные источники типа Фримана [5] и Бернса [6], а также их модификации. Для работы таких ионных источников необходимо наличие внешнего магнитного поля, величина которого растет с увеличением поперечного размера ленточного пучка, при этом масса электромагнита увеличивается по кубической зависимости. Необходимость создания, размещения и обеспечения электропитания массивного магнита создает ряд технических трудностей для размещения подобного типа источников под высоким потенциалом с целью дальнейшего ускорения ионов до требуемых энергий.

В качестве альтернативы источникам типа Фримана и Бернса был разработан источник ленточного пучка

ионов на основе ловушки Пеннинга с касповой конфигурацией силовых линий магнитного поля. По схеме он близок к источнику, предложенному в работе [7], который является модификацией каспового источника [8], но для создания магнитного поля используются постоянные магниты. Такой ионный источник позволяет получать стабильный во времени ленточный пучок с равномерным распределением плотности тока вдоль ширины пучка. Одной из ключевых особенностей используемой схемы является возможность получения пучков вплоть до метрового размера аналогично [9].

Внешний вид источника ионов и сечение модели газоразрядной камеры с распределением силовых линий магнитного поля в ней приведены на рис. 1. Магнитное поле создается двумя постоянными магнитами (NdFeB), которые намагничены встречно друг другу, что в совокупности с формой магнитного ярма создает касповую конфигурацию силовых линий магнитного поля. Один из полюсов магнитной системы удален со стороны щели для выхода ионного пучка. Это создает искаженное квадрупольное магнитное поле, компоненты которого полностью находятся в плоскости поперечного сечения. Внутри дуговой камеры, сразу за выходной щелью, находится область нулевого магнитного поля. Ввиду существенных потерь электронов в направлении магнитных полюсов такая конфигурация магнитного поля является значительно менее эффективной, нежели классическая ловушка Пеннинга. Для подавления потерь электронов вдоль каспов потенциал стенок газоразрядной камеры равен потенциалу катода. Анодные электроды, находящиеся под потенциалом от 50 до 150 V, располагаются в местах наиболее эффективного магнитного экранирования.

Стенки газоразрядной камеры (внутреннее поперечное сечение составляет около 10 cm²) изготовлены из

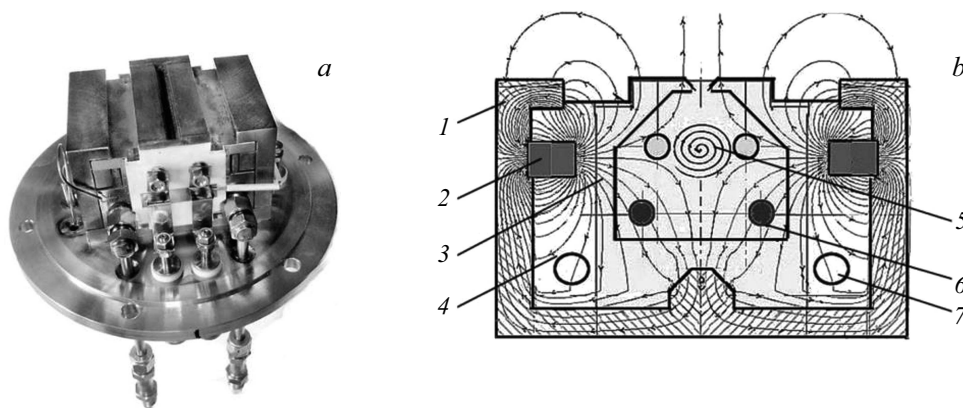


Рис. 1. Внешний вид источника ленточного ионного пучка (а) и сечение газоразрядной камеры (b). 1 — магнитное ярмо, 2 — постоянные магниты, 3 — керамический держатель катода, 4 — корпус газоразрядной камеры, 5 — вольфрамовый катод, 6 — анодные стержни, 7 — каналы водяного охлаждения.

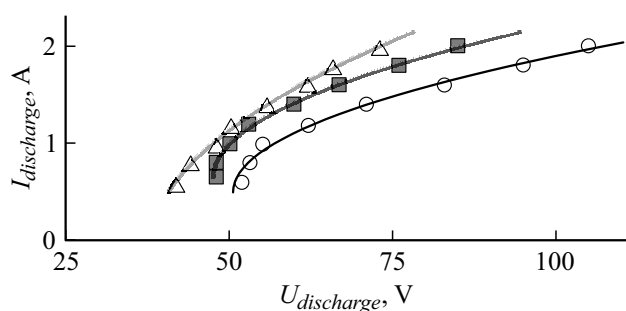


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики разряда в ионном источнике при значениях напуска рабочего газа 0.52 (кружки), 0.7 (квадраты) и 0.86 ml/min (треугольники).

немагнитной нержавеющей стали. Постоянные магниты вставлены в выемки на боковых поверхностях. Камера имеет водяное охлаждение, что необходимо для защиты постоянных магнитов от размагничивания. В конструкции установлены два термоэмиссионных катода, изготовленные из чистого вольфрама, которые расположены в противоположных торцах газоразрядной камеры и могут использоваться по отдельности или совместно. Держатели катодов закреплены на пластинах из жаропрочной керамики. Два молибденовых стержня проходят по всей длине газоразрядной камеры и являются анодами.

Для вытягивания ионного пучка из плазменного разряда используется трехэлектродная система. Энергия ионов, выходящих из системы экстракции, составляет около 10 keV. В проведенной серии экспериментов максимальное значение энергии ионов было ограничено сверху только пределами системы питания, а не конструктивными особенностями ионного источника и изолятора.

Формирование плазмы, из которой происходит вытягивание ионов, осуществляется при помощи газового разряда, инициированного эмитированными с катодов электронами. На рис. 2 приведены вольт-амперные ха-

рактеристики газового разряда при различной величине подачи рабочего газа (аргона). Величина вытягиваемого тока ионного пучка от тока дуги имеет значение до 2 %. Для ограничения тока пучка с целью защиты элементов экспериментального стенда от перегрева выходная щель ионного источника была уменьшена до 2 mm.

Одной из основных характеристик источников ленточных пучков является равномерность эмиссии ионов вдоль щели экстракции. Для измерения распределения плотности тока в поперечном направлении использовался профилометр. Данная диагностика представляет собой одиночный зонд, расположенный за щелью в охлаждаемом приемнике пучка (рис. 3). Датчик тока установлен на магнитном манипуляторе, позволяющем изменять положение датчика тока внутри вакуумной камеры без необходимости разгерметизации установки.

Результаты измерений, выполненных с помощью данной диагностики, приведены на рис. 4. Профиль пучка вдоль щели экстракции является преимущественно равномерным с относительной однородностью около 4 %. Линейная плотность тока при этом в среднем имеет величину около 10 mA/cm.

Существенным конструктивным отличием новой схемы источника ленточного пучка ионов на основе ловушки Пеннинга с квадрупольным магнитным полем от источников типа Фримана или Бернса является отсутствие внешних мощных магнитов, которые определяют размер вытягиваемых пучков (в схемах Фримана и Бернса). С одной стороны, данная особенность позволяет использовать ионные источники, выполненные по предложенной схеме, в установках, где критичным является размещение источников ионов на высоком потенциале с требованием по дополнительной передаче мощности на высоковольтную платформу и ограничениями по массогабаритным размерам. С другой стороны, появляется принципиальная возможность масштабирования линейных размеров получаемых пучков (размером 100 mm и более) при значениях линейных плотностей

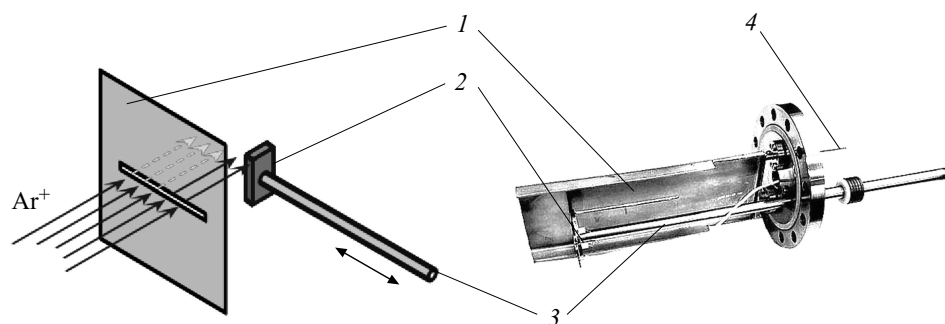


Рис. 3. Схема и внешний вид профилометра ионного пучка. 1 — приемник пучка с щелью, 2 — зонд, 3 — манипулятор на магнитном подвесе, 4 — ввод охлаждения приемника пучка.

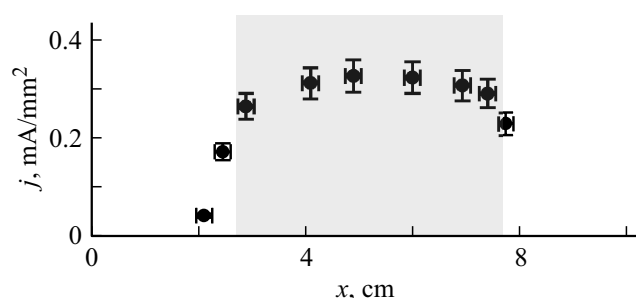


Рис. 4. Профиль плотности тока вдоль эмиссионной щели, измеренный при помощи подвижного зонда. Затемненная область отвечает размеру пучка в 50 mm с однородностью по выделенной области не хуже 4%

- [3] Y. Inouchi, T. Matsumoto, S. Dohi, M. Tanii, G. Takahashi, I. Nishimura, J. Tatemichi, M. Konishi, M. Naito, *Rev. Sci. Instrum.*, **85** (2), 02C312 (2014). DOI: 10.1063/1.4855017
- [4] J.M. Poate, K. Saadatmand, *Rev. Sci. Instrum.*, **73** (2), 868 (2002). DOI: 10.1063/1.1428782
- [5] J.H. Freeman, *Nucl. Instrum. Meth.*, **22**, 306 (1963). DOI: 10.1016/0029-554X(63)90257-X
- [6] I. Chavet, R. Bernas, *Nucl. Instrum. Meth.*, **51** (1), 77 (1967). DOI: 10.1016/0029-554X(67)90365-5
- [7] N.R. White, in *Ion beam technology and applications*, ed. by O. Artun (IntechOpen, 2023), p. 1–21. DOI: 10.5772/intechopen.111487
- [8] D.H. Yuan, R. Baartman, K.R. Kendall, M. McDonald, D.R. Moss crop, P.W. Schmor, *AIP Conf. Proc.*, **158**, 346 (1987). DOI: 10.1063/1.36547
- [9] N.R. White, A.O. Westner, *Phys. Procedia*, **90**, 187 (2017). DOI: 10.1016/j.phpro.2017.09.057

токов, сравнимых с получаемыми на источниках типа Бернаса.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания (шифр FWGM-2024-0001).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] T.R. Crowley, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **22** (4), 291 (1994). DOI: 10.1109/27.310636
- [2] A.V. Melnikov, L.I. Krupnik, L.G. Eliseev, J.M. Barcala, A. Bravo, A.A. Chmyga, G.N. Deshko, M.A. Drabinskij, C. Hidalgo, P.O. Khabanov, S.M. Khrebtov, N.K. Kharchev, A.D. Komarov, A.S. Kozachek, J. Lopez, S.E. Lysenko, G. Martin, A. Molinero, J.L. de Pablos, A. Soletto, M.V. Ufimtsev, V.N. Zenin, A.I. Zhezhera, T-10 Team and TJ-II Team, *Nucl. Fusion*, **57** (7), 072004 (2017). DOI: 10.1088/1741-4326/aa5382