

Разработка магнитной системы и системы формирования ионного пучка для протонного инжектора проекта DARIA

С. С. Выбин, И. В. Изотов, Е. А. Миронов, О. В. Палашов, В. А. Скалыга

Представлены результаты модернизации ЭЦР ионного источника GISMO в ИПФ РАН с целью разработки на его основе протонного инжектора, который в будущем будет являться составляющей частью линейного ускорителя для компактного источника нейтронов DARIA. В разрабатываемой системе для удержания плазмы используется адаптированная открытая ловушка на постоянных магнитах (NdFeB). Протонный пучок извлекается из плазмы с помощью трехэлектродной системы экстракции. Формирование слабо расходящегося пучка достигается за счет использования магнитной линзы в виде соленоида. Оптимизация системы экстракции проводится с помощью численного моделирования. По ее результатам удалось спроектировать систему формирования протонного пучка, удовлетворяющего требованиям DARIA.

Ключевые слова: ионный источник, сильноточные ионные пучки, ЭЦР разряд, магнитная ловушка, система формирования ионного пучка.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-4-29-33

Введение

Основными типами мощных источников нейтронов, используемыми в настоящее время, являются ядерные реакторы и установки, построенные на базе ускорителей заряженных частиц. Исходя из сложившейся тенденции, первые из них постепенно выводятся из эксплуатации, что приводит к уменьшению доступных нейтронных пучков. Среди нейтронных источников, построенных на базе ускорителей, можно выделить наиболее ин-

тенсивные (LANSCE [1], ISIS [2], SNS [3], ESS [4], J-PARC [5]), в которых энергия пучка может достигать десятков ГэВ, а нейтроны на мишени генерируются в ходе реакции скалывания. Однако, есть задачи, для которых использование таких дорогих источников нецелесообразно. В качестве примера можно привести обучение специалистов работе с нейтронными пучками, апробацию новых концепций и подготовку оборудования. Для решения таких задач подходят менее интенсивные, но более доступные компактные нейтронные источники, построенные на основе линейных ускорителей меньших энергий (2–20 МэВ). На текущий момент разрабатываются несколько проектов генераторов такого типа (SARAF [6], FRANZ [7], MUNES [8], DARIA [9]). В данной работе рассматривается разработка протонного инжектора для компактного источника нейтронов DARIA (Dedicated to Academic Research and Industrial Application). К протонному пучку на входе в ускоритель предъявляются следующие требования: полный ток не менее 100 мА, энергия пучка 40 кэВ, полный нормализованный эмиттанс менее 1π мм мрад (по доле пучка 95 %).

Выбин Сергей Сергеевич, старший лаборант-исследователь.

Изотов Иван Владимирович, зав. лаб., к.ф.-м.н.

Миронов Евгений Александрович, с.н.с., к.ф.-м.н.

Палашов Олег Валентинович, зав. отделом, зав. лаб., д.ф.-м.н.

Скалыга Вадим Александрович, гл.н.с., д.ф.-м.н.

E-mail: skalyga@ipfran.ru

Федеральный исследовательский центр

Институт прикладной физики РАН.

Россия, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46.

Статья поступила в редакцию 14 июля 2022 г.

© Выбин С. С., Изотов И. В., Миронов Е. А., Палашов О. В., Скалыга В. А., 2022

Ранее были успешно проведены испытания протонного источника GISMO (Gasdynamic Ion Source for Multipurpose Operation) [10], которые показали перспективность использования данного ионного источника для инъекции пучков в компактных источниках нейтронов на базе линейного ускорителя. GISMO является газодинамическим [11] ЭЦР ионным источником для различных приложений. За счет высокой вкладываемой в плазму мощности (до 10 кВт) и высокой частоты (28 ГГц) греющего излучения в непрерывном режиме обеспечивается создание плотных ионных потоков с плотностью до $1,5 \text{ А/см}^2$.

В данной работе представлены результаты исследований, направленных на модернизацию ионного источника GISMO для его полного соответствия требованиям и использования в качестве протонного инжектора для линейного ускорителя проекта DARIA.

Новая магнитная система

В качестве основы для разработанной магнитной ловушки используется магнитная система установки GISMO [12, 13]. Она является аксиально симметричной и состоит из постоянных магнитов, в которых вектор намагниченности направлен по радиусу либо параллелен оси вращения. В текущей магнитной ловушке система формирования пучка располагается в узкой части камеры (см. рис. 1). Это ограничивает возможности по выбору систем экстракции из-за ограничений поперечного размера системы. В новой системе обеспечены лучшие условия для создания системы экстракции ионного пучка. Пробка магнитной ловушки со стороны экстракции пучка располагается ближе к краю ловушки, что позволяет разместить экстрактор непосредственно в расширителе. Длина расширителя была уменьшена, а его внутренний поперечный размер увеличен. Схема магнитной системы представлена на рис. 1. В результате расчетов магнитная ловушка имеет следующие параметры: магнитное поле в пробке со стороны инъекции $B_{inj} = 1,55 \text{ Тл}$, минимальное поле на оси $B_{min} = 0,29 \text{ Тл}$, поле в пробке со стороны экстракции $B_{ext} = 1,44 \text{ Тл}$, масса магнитов $M = 376 \text{ кг}$, объем плазмы $V_{plasma} = 32 \text{ см}^3$, максимальная площадь поперечного сечения плазменной трубки $S_{plasma} = 8 \text{ см}^2$, расстояние между пробками $L = 125 \text{ мм}$. Для срав-

нения укажем соответствующие параметры для магнитной ловушки установки GISMO: $B_{inj}/B_{min}/B_{ext} = 1,61 \text{ Тл}/0,26 \text{ Тл}/1,61 \text{ Тл}$, $M = 132 \text{ кг}$, $V_{plasma} = 36 \text{ см}^3$, $S_{plasma} = 8 \text{ см}^2$, $L = 120 \text{ мм}$.

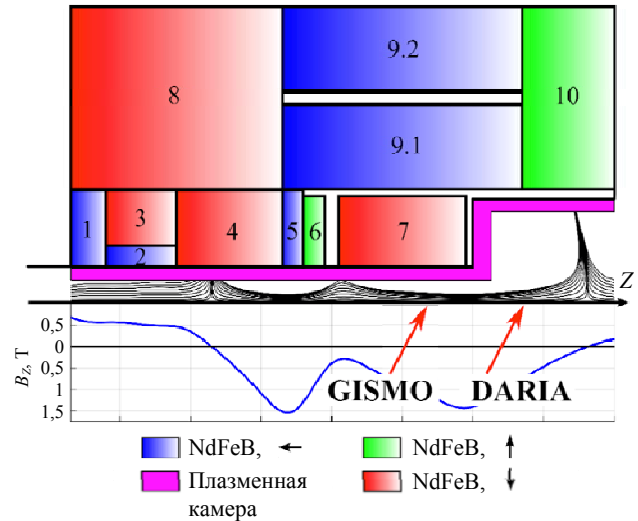


Рис. 1. Оптимизированная магнитная ловушка для протонного инжектора проекта DARIA. На рисунках изображены постоянные магниты (с указанием направления намагниченности), показано сечение плазменной камеры. Построены силовые линии магнитного поля и его профиль на оси Z. С левой стороны подается СВЧ-излучение и производится напуск нейтрального газа, а с правой извлекается ионный пучок. Стрелками отмечены примерные положения магнитной системы экстракции до (GISMO) и после (DARIA) модернизации системы

Оптимизация системы формирования пучка

Для удовлетворения требований к качеству пучка необходимо достичь высокой степени компенсации его пространственного заряда и добиться размещения области компенсированного пространственного заряда как можно ближе к экстрактору (чтобы избежать существенного увеличения эмиттанса пучка из-за влияния пространственного заряда). Для этого используется плоская трехэлектродная система экстракции, состоящая из плазменного электрода, вытягивающего электрода (пуллера) и заземленного электрода. Она дополнена магнитной линзой, которая формирует слабо расходящийся ионный пучок (см. рис. 2). Система экстракции характеризуется своими геометрическими параметрами: апертура плазменного электрода – D_1 , расстояние между плазменным и вытягивающим электродами – L , диаметр отверстия пуллера – D_2 .

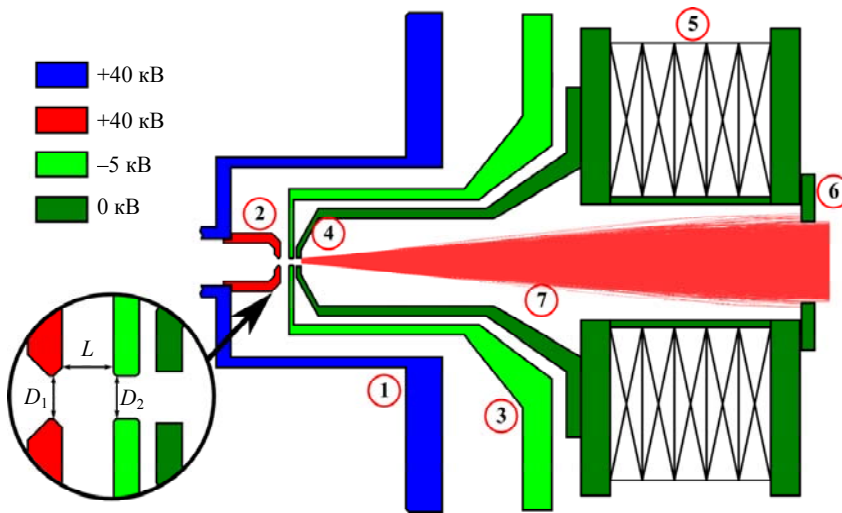


Рис. 2. Изображение системы экстракции. В неё входят: плазменный электрод (2) с плазменной камерой (1), пуллер (3), заземленный электрод (4), соленоид (5), диафрагма (6). Также указаны траектории ионного пучка (7). Система экстракции со своими геометрическими параметрами показана крупным планом

Для проведения расчета используется пакет библиотек для численного моделирования IBSimu [14]. Для расчета необходимо задать следующие характеристики потока плазмы, из которого формируется ионный пучок: температура ионов ($T_i = 1$ эВ), электронная температура ($T_e = 50$ эВ), энергия поступательного движения ионов ($E_0 = 50$ эВ), потенциал плазмы ($U_{pl} = 50$ В). В скобках приведены значения, характерные для плазмы, получаемой экспериментально. Для простоты считается, что ионный пучок состоит полностью из протонов. Начальная плотность потока плазмы составляет 600 mA/cm^2 . В расчете также предполагается, что пространственный заряд ионного пучка частично компенсирован (степень компенсации равна 90 %).

Основной целью оптимизации является формирование пучка с минимальным эмиттансом при полном токе не ниже заданного (100 мА). Были проведены расчеты формирования ионного пучка для экстракторов с различными геометрическими размерами (D_1 , L , D_2). Оптимум был достигнут при $D_1 = 5$ мм, $L = 7$ мм, $D_2 = 6$ мм. Дальнейшая оптимизация системы экстракции направлена на уменьшение влияния краевых эффектов. Для этого используется плазменный электрод с обратным скосом (см. рис. 3). Он позволяет уменьшить величину S-образных хвостов на диаграмме эмиттанса. Также была проведена оптимизация по геометрическим параметрам скоса. Оптимальный угол скоса составил 45 градусов, а его поперечный размер – $dR = 1$ мм.

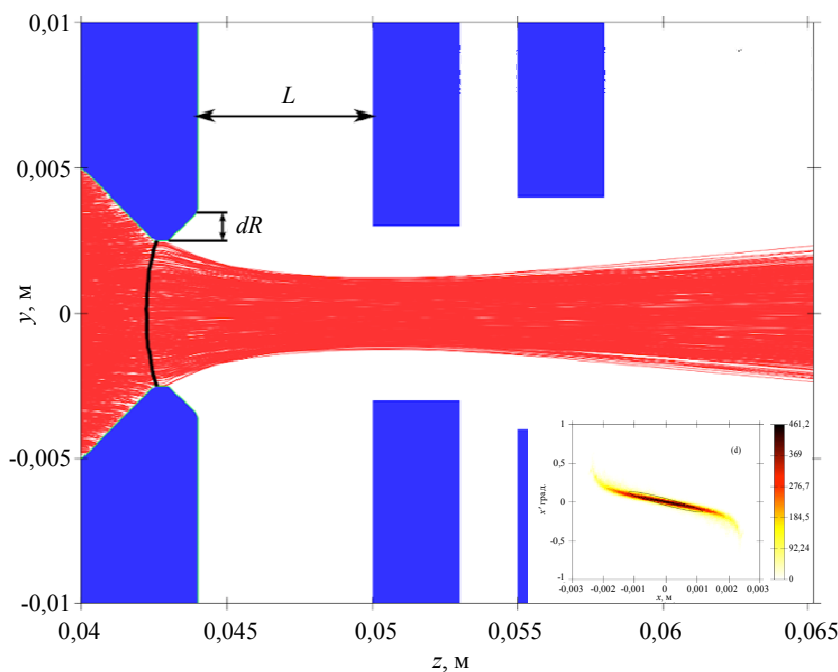


Рис. 3. Формирование ионного пучка оптимизированной системой экстракции. Показаны траектории пучка (красным), профиль электродов (синим) и соответствующая диаграмма эмиттанса. Черная линия обозначает плазменный мениск

Еще одним способом снижения краевых эффектов является формирование пучка с током больше необходимого и использованием диафрагмы, ограничивающей ток пучка (см. рис. 4). На графиках зависимости эмиттанса от тока пучка видно, что эмиттанс начинает сильнее расти за счет вклада в ток частиц с периферии пучка. Путем подбора размера диафрагмы можно получить пучок, удовлетворяющий требованиям: с током более 100 мА и эмиттансом равным $0,66 \pi$ мм мрад (по доле пучка 95 %). Заметим, что в последней оптимальной конфигурации экстрактора весь ионный пучок удовлетворяет требованиям (его не нужно ограничивать диафрагмой). Следовательно, у ионного источника есть возможность по увеличению тока пучка (оставаясь в рамках ограничения на эмиттанс), если это будет необходимо.

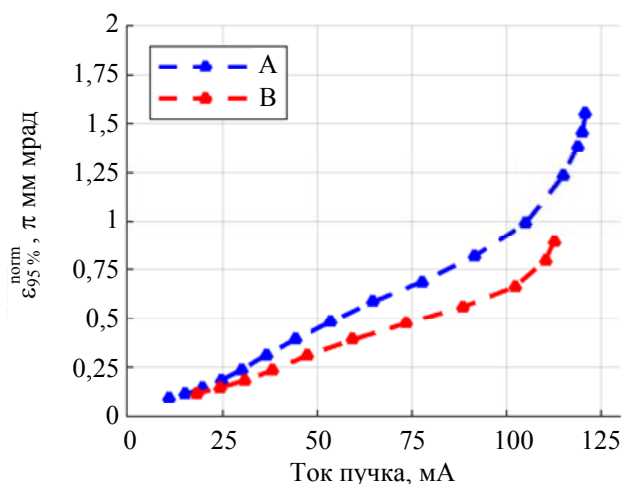


Рис. 4. Зависимость полного нормализованного эмиттанса пучка (доля 95 %) от доли пучка, прошедшего через диафрагму. Красному цвету на графике соответствует экстрактор на рис. 3, а синему – экстрактор без обратного скоса плазменного электрода (или при $dR = 0$). Различные точки на графике получены путем изменения размера отверстия в диафрагме

Заключение

Таким образом, была проведена модернизация магнитной системы и системы формирования пучка для протонного инжектора проекта DARIA. Использование новой магнитной ловушки позволило разместить систему экстракции непосредственно в расширителе, что позволяет обеспечить большой запас электропрочности зазоров между электродами

и снизить влияние возможных паразитных разрядов пеннинговского типа. Были проведены расчеты формирования ионного пучка из плазмы при различных геометрических параметрах экстрактора. По их результатам была найдена оптимальная конфигурация. Далее экстрактор был доработан для уменьшения краевых эффектов. Для этого был использован плазменный электрод с обратным скосом, а также диафрагма, отсекающая ионный пучок на периферии. По итогам оптимизации был проведен расчет экстракции ионного пучка, удовлетворяющего требованиям проекта: пучок имеет ток более 100 мА, энергию 40 кэВ, а его полный нормализованный эмиттанс составляет $0,66 \pi$ мм мрад (по доле пучка 95 %).

Данная работа выполнена в рамках
научного проекта № 075-15-2022-830
«Разработка компактных источников
фотонов и нейтронов на базе новых техноло-
гий линейных ускорителей – основных
элементов лазера на свободных электронах
и импульсных нейтронных источниках»,
финансируемого Министерством образования
Российской Федерации

ЛИТЕРАТУРА

1. *Batygin Y. K., Garnett R. W., Rybarczyk L.* / in Proc. 61st ICFA ABDW on High-Intensity and High-Brightness Hadron Beams (HB'18) (Daejeon, Korea, June 2018). P. 70–74.
2. *Thomason J. W. G.* // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2019. Vol. 917. P. 61.
3. *N. Holtkamp N.* / in Proc. Linear Accelerator Conf. (LINAC 2004), (Lübeck, Germany). P. 837–841.
4. *Eshraqi M., et al.* / in Proc. 5th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC'14), (Dresden, Germany, June 2014). P. 3320–3322.
5. *Friend M. L.* / in Proc. IBIC'18 (Shanghai, China, Sep. 2018). P. 85–88.
6. *Mardor I., Aviv O., Avrigeanu M., et al.* // Eur. Phys. J. A. 2018. Vol. 54. P. 91.
7. *Ratzinger U., Basten M., Chau L. P., et al.* / in Proc. International Particle Accelerator Conference (IPAC 2011) (San Sebastián, Spain, 2011). P. 2577.
8. *Pisent A., Fagotti E., Colautti P.* in Proc. Linear Accelerator Conf. (LINAC 2014) (Geneva, Switzerland, 2014). P. 261.
9. *Kropachev G., Kulevoy T., Sitnikov A.* // Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2019. Vol. 13. P. 1126.

10. Барабин С. В., Крощачев Г. Н., Лукашин А. Ю., Кулевой Т. В., Выбин С. С., Голубев С. В., Изотов И. В., Киселева Е. М., Скалыга В. А., Григорьев С. В., Коваленко Н. А. // Письма в ЖТФ. 2021. Т. 47. Вып. 10. С. 7.
 11. Skalyga V. A., Golubev S. V., Izotov I. V., et al. // Plasma Phys Rep. 2019. Vol. 45. P. 984.

12. Skalyga V. A., Bokhanov A. F., Golubev S. V., et al. // Rev. Sci. Instrum. 2019. Vol. 90. P. 123308.
 13. Skalyga V. A., Izotov I. V., Mironov E. A., Voitovich A. V., Palashov O. V. // AIP Conference Proceedings. 2016. Vol. 1771. P. 070014.
 14. Kalvas T., Tarvainen O., Ropponen T., et al. // Rev. Sci. Instrum. 2010. Vol. 81. P. 02B703.

PACS: 52.50.Dg

Development of a magnetic system and an ion beam formation system for the proton injector of the DARIA project

S. S. Vybin, I. V. Izotov, E. A. Mironov, O. V. Palashov, and V. A. Skalyga

Federal Research Center Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences (IAP RAS)
 46 Ulyanova st., Nizhny Novgorod, 603950, Russia
 E-mail: Skalyga.vadim@gmail.com

Received July 14, 2022

The paper presents results of an upgrade of the GISMO ECR ion source at the IAP RAS in order to develop a proton injector, which in the future will be an integral part of the linear accelerator for the DARIA compact neutron source. The developed system uses an adapted open permanent magnet trap (NdFeB) to confine a plasma. The proton beam is extracted from the plasma using a three-electrode extraction system. The formation of a weakly divergent beam is achieved by using a magnetic lens in the form of a solenoid. The optimization of the extraction system is carried out using numerical simulation. The system for the formation of a proton beam that meets the requirements of DARIA was designed.

Keywords: ion source, high-current ion beams, ECR discharge, magnetic trap, ion beam formation system.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-4-29-33

REFERENCES

1. Y. K. Batygin, R. W. Garnett, and L. Rybarczyk, in *Proc. 61st ICFA ABDW on High-Intensity and High-Brightness Hadron Beams (HB'18)* (Daejeon, Korea, June 2018), pp. 70–74.
2. J. W. G. Thomason, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* **917**, 61 (2019).
3. N. Holtkamp, in *Proc. Linear Accelerator Conf. (LINAC 2004)* (Lübeck, Germany, 2004), pp. 837–841.
4. M. Eshraqi, et al., in *Proc. 5th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC'14)* (Dresden, Germany, June 2014), pp. 3320–3322.
5. M. L. Friend, in *Proc. IBIC'18* (Shanghai, China, Sep. 2018), pp. 85–88.
6. I. Mardor, O. Aviv, M. Avrigeanu, et al., *Eur. Phys. J. A* **54**, 91 (2018).
7. U. Ratzinger, M. Basten, L. P. Chau, et al., in *Proc. International Particle Accelerator Conference (IPAC 2011)* (San Sebastián, Spain, 2011), p. 2577.
8. A. Pisent, E. Fagotti, and P. Colautti, in *Proc. Linear Accelerator Conf. (LINAC 2014)* (Geneva, Switzerland, 2014), p. 261.
9. G. Kropachev, T. Kulevoy, and A. Sitnikov, *Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques* **13**, 1126 (2019).
10. S. V. Barabin, G. N. Kropachev, A. Yu. Lukashin, T. V. Kulevoy, S. S. Vybin, S. V. Golubev, I. V. Izotov, E. M. Kiseleva, V. A. Skalyga, S. V. Grigoriev, and N. A. Kovalenko, *Technical Physics Letters* **47** (7), 485 (2021). <https://doi.org/10.1134/s1063785021050199>
11. V. A. Skalyga, S. V. Golubev, I. V. Izotov, et al., *Plasma Phys. Rep.* **45**, 984 (2019).
12. V. A. Skalyga, A. F. Bokhanov, S. V. Golubev, et al., *Rev. Sci. Instrum.* **90**, 123308 (2019).
13. V. A. Skalyga, I. V. Izotov, E. A. Mironov, A. V. Voitovich, and O. V. Palashov, *AIP Conference Proceedings* **1771**, 070014 (2016).
14. T. Kalvas, O. Tarvainen, T. Ropponen, et al., *Rev. Sci. Instrum.* **81**, 02B703 (2010).