Научная статья

УДК 537.562; 537.563; 537.565; 533.9.03 DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-2-36-45

Разработка и испытания высокочастотного драйвера перезарядного источника отрицательных ионов водорода

Кристина Игоревна Аникеева¹, Вадим Александрович Воинцев², Даниил Юрьевич Гаврисенко³, Олег Захарович Сотников⁴, Роман Андреевич Финашин⁵, Игорь Владимирович Шиховцев⁶

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

¹chris.yushkova1@gmal.com
 ²vointsev1998@mail.ru
 ³d.gavrisenko@g.nsu.ru
 ⁴Sotnikov@inp.nsk.su
 ⁵R.A.Finashin@inp.nsk.su
 ⁶I.V.Shikhovtsev@inp.nsk.su

Аннотация

Источник отрицательных ионов водорода на основе перезарядки пучка положительных ионов в газовой мишени разрабатывается в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН. Перезарядный источник может быть использован для инжекции в тандемный ускоритель нейтронного источника, предназначенного для бор-нейтронозахватной терапии. Одним из важных элементов источника является плазменный эмиттер, создающий положительные ионы для первичного ускорения. В качестве эмиттера выбран высокочастотный драйвер, основанный на индукционном разряде и рассчитанный на многосекундный режим работы. В данной работе проведены измерения эмиссионных характеристик высокочастотного драйвера с использованием подвижного сеточного зонда. В результате достигнуты параметры, необходимые для применения драйвера в перезарядном источнике отрицательных ионов. Проведен анализ экспериментально измеренных тепловых нагрузок в многосекундном режиме.

Ключевые слова

индукционный разряд, ионный источник, отрицательные ионы, стационарный режим работы.

Источник финансирования

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 20-32-90053. Проектирование, изготовление и покупка оборудования частично поддержаны Министерством науки и высшего образования Российской Федерации.

Для цитирования

Аникеева К. И., Воинцев В. А., Гаврисенко Д. Ю., Сотников О. З., Финашин Р. А., Шиховцев И. В. Разработка и испытания высокочастотного драйвера перезарядного источника отрицательных ионов водорода // Сибирский физический журнал. 2023. Т. 18, № 2. С. 36–45. DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-2-36-45

© Аникеева К. И., Воинцев В. А., Гаврисенко Д. Ю., Сотников О. З., Финашин Р. А., Шиховцев И. В., 2023

Development and Testing of a High-Frequency Driver for a Charge-Exchange Source of Negative Hydrogen Ions

Kristina I. Anikeeva¹, Vadim A. Vointsev², Daniil Y. Gavrisenko³, Oleg Z. Sotnikov⁴, Roman A. Finashin⁵, Igor V. Shikhovtsev⁶

> Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS Novosibirsk, Russia

¹chris.yushkova1@gmal.com
²vointsev1998@mail.ru
³d.gavrisenko@g.nsu.ru
⁴Sotnikov@inp.nsk.su
⁵R.A.Finashin@inp.nsk.su
⁶I.V.Shikhovtsev@inp.nsk.su

Abstract

A source of negative hydrogen ions based on the recharging of a beam of positive ions in a gas target is being developed at the Institute of Nuclear Physics. G.I. Budker SB RAS. The charge exchange source can be used to inject into the tandem accelerator a neutron source intended for boron neutron capture therapy. One of the important elements of the source is the plasma emitter, which creates positive ions for primary acceleration. As an emitter, a high-frequency driver based on an induction discharge and designed for a multi-second operating mode was chosen. In this work, we measured the emission characteristics of a high-frequency driver using a moving grid probe. As a result, the parameters necessary for the use of the driver in a rechargeable source of negative ions have been achieved. The analysis of experimentally measured thermal loads in the multisecond mode is carried out.

Keywords

induction discharge, ion source, negative ions, stationary operation

Funding

The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, Project No. 20-32-90053. The design, manufacture and purchase of equipment were supported in part by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

For citation

Anikeeva K. I., Vointsev V. A., D. Gavrisenko D. I., Sotnikov O. Z., Finashin R. A., Shikhovtsev I. V. Development and testing of a high-frequency driver for a charge-exchange source of negative hydrogen ions. *Siberian Journal of Physics*, 2023, vol. 18, no. 2, pp. 36–45 (in Russ). DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-2-36-45

Введение

В Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН разработана серия нагревных и диагностических инжекторов [1]. Одним из новых перспективных направлений разработки является перезарядный источник отрицательных ионов водорода с многосекундной длительностью импульса [2]. Одним из применений перезарядного источника отрицательных ионов может быть создание интенсивного пучка для бор-нейтронозахватной терапии [3]. В перезарядном источнике пучок отрицательных ионов водорода формируется при диссоциации и перезарядке ускоренного пучка положительных молекулярных ионов водорода H₂⁺ в водородной мишени. Неперезарядившиеся положительные ионы отделяются от пучка с помощью магнитного сепаратора. Для создания первичного пучка положительных ионов вытягивается из высокочастотным драйвером. Пучок положительных ионов вытягивается из высокочастотного индукционного разряда [4] и ускоряется ионно-оптической системой до энергии 30 кэВ. Разряд создается и поддерживается в ВЧ-драйвере внешней антенной. Одной из основных проблем получения пучка в режиме многосекундных импульсов является нагрев элементов ВЧ-драйвера при взаимодействии с плазмой и джоулева нагрева индукционными токами, которые наводятся ВЧ-полем антенны ВЧ-драйвера.

Целью данной работы является достижение стабильной работы ВЧ-драйвера при длительных режимах работы, более 10 секунд, и получение эмиссионной плотности тока ионов ~ 100–150 мА/см².

1. ВЧ-драйвер для стационарного режима работы

Схема ВЧ-драйвера представлена на рис. 1. Цилиндрическая часть драйвера 2 изготовлена из керамики (Al_2O_3) с внутренним диаметром 200 мм, зажата с торцов задним и передним фланцами. Для вакуумного уплотнения и повышения теплопроводности между керамикой и фланцами используется прокладка из индия. Снаружи на керамику намотана 3-витковая антенна 1, изготовленная из медной трубки диаметром 6 мм и покрытая термоусаживающейся изоляцией. В центре задней стенки располагается узел поджига 4, состоящий из канала подачи газа и изолированного электрода. Для снижения потока плазмы на заднюю стенку и повышения эффективности разряда на задней стенке расположены магниты, формирующие мультипольное магнитное поле. Для охлаждения элементов ВЧ-драйвера через антенну, каналы в узле поджига, периферию заднего и переднего фланцев прокачивается дистиллированная вода.



Рис. 1. Схема ВЧ-драйвера для стационарного источника отрицательных ионов: *1* – антенна; *2* – керамика; *3* – подвод воды к системе охлаждения; *4* – узел поджига; *5* – система напуска газа; *6* – медный защитный экран; *7* – клеммы антенны

Fig. 1. RF driver circuit for a stationary source of negative ions: 1 - antenna; 2 - ceramics; 3 - water supply to the cooling system; 4 - ignition unit; 5 - gas starting system; 6 - copper screen; 7 - antenna terminals

Внутри газоразрядной камеры установлен защитный цилиндрический экран из меди с продольными щелями, предназначенный для защиты керамики от взаимодействия с плазмой, которое может приводить к перегреву, покрытию и распылению керамики. Схема экрана представлена на рис. 2. Экран имеет активное охлаждение: с двумя входами и двумя выходами. Каждая ламель охлаждается с помощью припаянной медной трубки диаметром 3 мм с толщиной стенки 0,5 мм, через которую протекает дистиллированная вода. Каналы охлаждения ламелей 2 углублены в керамику *1* для уменьшения расстояния от антенны до внутренней стенки



экрана. Для защиты от перегрева задней стенки перед ней установлена молибденовая пластина с припаянной медной трубкой, через которую протекает дистиллированная вода.



Создание ионов в ВЧ-драйвере происходит следующим образом. Сначала в камеру напускается водород. Затем на антенну подается переменное напряжение амплитудой несколько киловольт и частотой 4 МГц. Ток в антенне создает переменное магнитное поле внутри камеры. Такое магнитное поле индуцирует переменное азимутальное электрическое поле. На изолированный электрод узла поджига подается импульс напряжения 4 кВ и длительностью 10 мкс, который создает пробой между электродом и корпусом задней стенки. Электроны, возникшие в результате пробоя, ускоряются высокочастотным электрическим полем антенны и ионизуют газ. После зажигания разряд поддерживается переменным электромагнитным полем.

2. Экспериментальный стенд

Схема стенда по испытанию ВЧ-драйверов плазмы представлена на рис. 3. Экспериментальный стенд представляет собой цилиндрический вакуумный объем 9. К верхнему торцу объема пристыкован исследуемый ВЧ-драйвер 2. Объем откачивается турбомолекулярным насосом (ТМН) до давления ~ 1 · 10⁻⁴ Па. Переменное напряжение на антенне создается при помощи ВЧ-генератора на основе тетрода. Для увеличения тока в антенне используется параллельный колебательный контур, индуктивностью которого является антенна 8. Между ВЧ-генератором и ВЧ-драйвером находится разделительный трансформатор. Подача газа осуществляется с помощью двух клапанов. Первый клапан – поджиговый, создает давление 1–2 Па, необходимое для зажигания разряда. Он включается в начале импульса на 0,1 сек. Второй клапан – рабочий необходим для поддержания рабочего давления 0,3–0,6 Па при получении пучка. Экспериментальный стенд оборудован рядом диагностик. Для измерения плотности ионного тока и его профиля используется сеточный зонд, описанный в [5], который может передвигаться вдоль диаметра ВЧ-драйвера с помощью подвижного вакуумного ввода. Для измерения температуры элементов ВЧ-драйвера и защитного экрана использовался тепловизор FLIR 650. В нижней части объема находится инфракрасно-прозрачное окно из фторида бария, для температурного контроля внутренних поверхностей ВЧ-драйвера. Водяное охлаждение элементов ВЧ-драйвера, защитного экрана и задней стенки осуществляется через разные каналы. На выходных каналах установлены измерители потока и температуры.



Рис. 3. Экспериментальный стенд ВЧ-генератора плазмы: 1 – система подачи газа с двумя клапанами; 2 – ВЧ-драйвер; 3 – конденсаторы антенного колебательного контура; 4 – внешний цилиндрический экран; 5 – цилиндрический вакуумный объем; 6 – окно с видом на защитный экран; 7 – сеточный зонд для измерения плотности ионного тока; 8 – внешняя трехвитковая антенна

Fig. 3. Experimental stand for a high-frequency plasma generator: 1 - gas supply system with two valves; 2 - HF driver; 3 - capacitors of the antenna oscillatory circuit; 4 - external cylindrical screen; <math>5 - cylindrical vacuum volume; 6 - window overlooking the protective screen; <math>7 - grid probe for measuring ion current density; 8 - external three-turn antenna

3. Зондовые измерения плотности ионного тока

Зондовые измерения производились в режиме импульсов длительностью 50 мс. В этом случае давление в ВЧ-драйвере и вакуумной камере определяется поджиговым клапаном. Зонд находился на выходе ВЧ-драйвера, на уровне переднего фланца, на оси ВЧ-драйвера. На рис. 4 представлена зависимость плотности ионного тока от ВЧ-мощности. Полученная зависимость является линейной. Плотность тока составила 204 мА/см² при ВЧ мощности

13,8 кВт, соответствующая напряжению на антенне 5,7 кВ. Для формирования пучка в ионном источнике необходима плотности тока не более 100 мА/см², которая получается при мощности порядка 6–8 кВт и напряжении 4,5–5 кВ на антенне.



Рис. 4. Зависимость плотности ионного тока на сеточный зонд от выходной мощности ВЧ-генератора. Давление в вакуумном объеме 0,46 Па *Fig. 4.* Dependence of the ion current density on the grid probe on the output power of the RF generator. The pressure in the vacuum volume is 0,46 Pa



Рис. 5. Профиль плотности ионного тока вдоль диаметра на выходе ВЧ-драйвера при ВЧ-мощности 7,6 кВт. Давление в вакуумном объеме 0,42 Па

Fig. 5. Profile of the ion current density along the diameter at the output of the RF driver at an RF power of 7,6 kW. The pressure in the vacuum volume is 0,42 Pa

Профиль плотности ионного тока, измеренный вдоль диаметра ВЧ-драйвера, представлен на рис. 5. Профиль имеет однородную область эмиссии 100 мА/см² в диаметре 120 мм. Для ионно-оптической системы диаметром 70 мм получается ток 3,8 A, а профиль плотности ионного тока имеет однородность порядка 3 %. Это соответствует высокой однородности эмиссии ионов в разработанном драйвере.

4. Тепловые нагрузки на элементы ВЧ-драйвера

Для изучения тепловых нагрузок была проведена серия экспериментов в режиме работы ВЧ-драйвера длительностью 30 с. Давление газа в разряде составляет 0,55 Па. Осциллограмма такого импульса представлена на рис. 6. На рисунке показана выходная мощность ВЧ-генератора и мощности, отводимые водяным охлаждением, которые характеризуют нагрев элементов ВЧ-драйвера: мощность охлаждения защитного экрана, мощность охлаждения задней стенки, мощность охлаждения фланцев, узла поджига и антенны. В начальный период времени с 0 до 1 сек наблюдался выброс 16 кВт выходной мощности ВЧ-генератора, затем мощность выходит на уровень 9 кВт. Это связано с уменьшением давления в ВЧ драйвере с 1,8 Па до 0,55 Па за первые 2 с импульса. Мощность охлаждения всех элементов вышла на стационарный режим за 20 сек и составила 4,5 кВт.



Рис. 6. Осциллограмма ВЧ-мощности на выходе генератора и мощности, отводимой с элементов драйвера в 30-секундном импульсе: P_{RF} – выходная мощность ВЧ-генератора; P_{FS} – мощность, отводимая водяным охлаждением с защитного экрана; P_{BP} – мощность, отводимая водяным охлаждением с молибденовой пластины; $P_{chamber}$ – мощность, отводимая водяным охлаждением с переднего и заднего фланцев, узла поджига и антенны

Fig. 6. Oscillogram of the RF power at the output of the generator and the power removed from the driver elements in a 30 second pulse. P_{RF} is the output power of the *RF* generator, P_{FS} is the power dissipated by water cooling from the protective screen, P_{BP} is the power dissipated by water cooling from the protective screen, P_{BP} is the power dissipated by water cooling from the front and rear flanges, the ignition unit and the antenna

Были измерены температуры поверхностей элементов ВЧ-драйвера после импульса ВЧ-разряда мощностью 9 кВт и длительностью 30 с. Результаты представлены на рис. 7. Керамика нагрелась до 35 °C, при этом максимальная температура нагрева внешних поверхностей не превысила 50 °C. Самую высокую температуру имеют стальные шпильки, которые стягивают задний и передний фланцы, и стальные хомуты, которые фиксируют зажимы антенны. Это связано с тем, что эти стальные элементы расположены близко к антенне и подвержены индукционному нагреву и не имеют активного охлаждения.

ISSN 2541-9447 Сибирский физический журнал. 2023. Том 18, № 2 Siberian Journal of Physics, 2023, vol. 18, no. 2



Рис. 7. Температура внешних поверхностей ВЧ-драйвера сразу после выстрела. Длительность импульса – 30 с, ВЧ-мощность – 9 кВт, давление в драйвере – 0,55 Па *Fig.* 7. Temperature of the external surfaces of the HF driver immediately after the shot. Pulse duration – 30 seconds, RF power – 9 kW, driver pressure – 0,55 Pa

Для измерения температуры защитного экрана и задней стенки газоразрядной камеры использовалось инфракрасно-прозрачное окно из фторида бария. На рис. 8 показано изображение с тепловизора после импульса ВЧ-разряда мощностью 9 кВт и длительностью 30 с. Экран нагрелся однородно. Максимальная температура не превысила 50 °C. Внутренняя поверхность керамики имеет температуру ~35 °C, что совпадает с измерениями снаружи, показанными на рис. 7. После десяти импульсов длительностью 30 сек при визуальном осмотре изменений внутренней поверхности ВЧ-драйвера не обнаружено.



Рис. 8. Температура внутренней поверхностей ВЧ-драйвера сразу после выстрела. Длительность импульса – 30 с, ВЧ-мощность – 9 кВт, давление в драйвере – 0,55 Па *Fig.* 8. Temperature of the internal surfaces of the HF driver immediately after the shot. Pulse duration – 30 seconds, RF – power 9 kW, driver pressure – 0,55 Pa

Выводы

В статье приведены результаты исследования драйвера с медным щелевым экраном. Достигнуты необходимые параметры эмиссии: плотность тока – 100 мА/см² при ВЧ-мощности 6–8 кВт, однородность профиля плотности ионного тока – 3 % в области плазменного электрода диаметром 70 мм. Продемонстрирована работа ВЧ-драйвера в многосекундном режиме работы: 30 сек при ВЧ-мощности на выходе ВЧ-генератора 9 кВт. Защитный экран с прямыми щелями и отдельным охлаждением каждой ламели обеспечил достаточную защиту керамики от нагрева. Нагрев элементов ВЧ-драйвера и экрана не превысил 70 °С. Плазменный драйвер испытан и готов к следующим этапам работ с перезарядным источником отрицательных ионов.

Список литературы

- Бельченко Ю. И., Давыденко В. И., Дейчули П. П., Емелев И. С., Иванов А. А., Колмогоров В. В., Константинов С. Г., Краснов А. А., Попов С. С., Санин А. Л., Сорокин А. В., Ступишин Н. В., Шиховцев И. В., Колмогоров А. В., Атлуханов М. Г., Абдрашитов Г. Ф., Драничников А. Н., Капитонов В. А., Кондаков А. А. Исследования по физике и технике ионных и атомарных пучков в ИЯФ СО РАН // Успехи физических наук. 2018. Т. 188. № 6. С. 595–650.
- Shikhovtsev I., Amirov V., Anikeeva K., Davydenko V., Emelev I., Ivanov A., Mishagin V., Rashchenko V., Maslakov I., Shubin E. A 10 mA, steady-state, charge exchange negative ion beam source // AIP Conference Proceedings 30 July 2021. Vol. 2373 (1). P. 040001. https://doi. org/10.1063/5.0057483
- 3. Таскаев С. Ю., Каныгин В. В. Бор-нейтронозахватная терапия. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2016.
- 4. Shikhovtsev I. et al. Inductive RF drivers for neutral beam injectors at BINP // AIP Conf. Proc. 2018. Vol. 2052. P. 040016.
- Воинцев В. А., Гаврисенко Д. Ю., Кондаков А. А., Сотников О. З., Финашин Р. А. Исследование высокочастотного генератора плазмы с многосекундной длительностью работы // Сибирский физический журнал. 2022. Т. 17, вып. 3. С. 5-11. doi.org/10.25205/2541-9447-2022-17-3-5-11

References

- Belchenko Yu. I., Davydenko V. I., Deychuli P. P., Emelev I. S., Ivanov A. A., Kolmogorov V. V. ., Konstantinov S. G., Krasnov A. A., Popov S. S., Sanin A. L., Sorokin A. V., Stupishin N. V., Shikhovtsev I. V., Kolmogorov A. V., Atlukhanov M. G., Abdrashitov G. F., Dranichnikov A. N., Kapitonov V. A., Kondakov A. A. Research on the physics and technology of ion and atomic beams at the Institute of Nuclear Physics SB RAS. *Advances in Physical Sciences*, 2018, vol. 188, no. 6, pp. 595-650.
- Shikhovtsev I., Amirov V., Anikeeva K., Davydenko V., Emelev I., Ivanov A., Mishagin V., Rashchenko V., Maslakov I., Shubin E. A 10 mA, steady-state, charge exchange negative ion beam source. *AIP Conference Proceedings 30 July 2021*, vol. 2373(1), pp. 040001. https://doi. org/10.1063/5.0057483
- 3. Taskaev Yu. S., Kanygin V. V. Boron-neutron capture therapy. Novosibirsk: Publishing house of the Siberian branch of the RAS, 2016.
- 4. Shikhovtsev I. et al. nductive RF drivers for neutral beam injectors at BINP. *AIP Conf. Proc.*, 2018, vol. 2052, p. 040016.
- Vointsev V. A., Gavrisenko D. Yu., Kondakov A. A., Sotnikov O. Z., Finashin R. A. Study of a high-frequency plasma generator with multi-second operation duration. *Siberian Physical Journal*, 2022, vol. 17(3), pp. 5-11. doi.org/10.25205/2541-9447-2022-17-3-5-11

Сведения об авторах

Кристина Игоревна Аникеева, младший научный сотрудник Вадим Александрович Воинцев, аспирант Даниил Юрьевич Гаврисенко, магистрант Олег Захарович Сотников, кандидат физико-математических наук Роман Андреевич Финашин, кандидат технических наук Игорь Владимирович Шиховцев, кандидат физико-математических наук

Information about the Authors

Kristina I. Anikeeva, Junior Researcher
Vadim A. Vointsev, Graduate Student
Daniil Y. Gavrisenko, Master's Student
Oleg Z. Sotnikov, Candidate of Physical and Mathematical Sciences
Roman A. Finashin, Candidate of Technical Sciences
Igor V. Shikhovtsev, Candidate of Physical and Mathematical Sciences

Статья поступила в редакцию 10.08.2023; одобрена после рецензирования 22.08.2023; принята к публикации 12.09.2023

The article was submitted 10.08.2023; approved after reviewing 22.08.2023; accepted for publication 12.09.2023