

**DISCHARGE AND EMISSION CHARACTERISTICS OF A COMPACT
ATOMIC AND MOLECULAR HYDROGEN ION SOURCE**

*Alexey Sergeevich Bugaev¹, Vasily Ivanovich Gushenets¹,
Efim Mihailovich Oks^{1,2}, Maksim Valentinovich Shandrikov^{1a}*

¹ Institute of High Current Electronics, Akademicheskyy pr. 2/3, 634055, Tomsk, Russia

² Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Lenin pr. 40, 634050, Tomsk, Russia

^a shandrikov@opec.hcei.tsc.ru

ABSTRACT

The article describes the design and gives the discharge and emission characteristics of a compact hydrogen ion source based on a discharge with a hollow cathode initiated by a Penning-type discharge. The geometry of the discharge system is a modification of the rather well-known design of the plasma generator used in electron plasma sources and sources of “sputtering” ions. The discharge system of the ion source operates in a continuous mode, but is also capable of operating in a repetitively pulsed mode. The extraction and formation of the ion beam is carried out by a three-electrode optical system with an electrode cone-opening angle of 90°. The design of the ion-optical system makes it possible to operate at accelerating voltages up to 30 kV and form beams of protons and molecular hydrogen ions with current densities over 100 mA/cm². In the continuous mode, a total ion beam current about 14 mA was obtained at a discharge current of 450~500 mA and with an emission diameter of 3.5 mm. Using a separator based on a bending electromagnet, detailed panoramic mass spectra of the ion beam were obtained for the first time for this ion source type. The discharge system of the plasma generator, the research results of which are presented in the article, is distinguished by its simple and compact design, a significant continuous operation resource, high reliability, low operating costs, etc.

KEYWORDS

Reflective discharge; discharge with oscillating electrons; hollow cathode discharge; proton and molecular ion source; plasma generator.

**РАЗРЯДНЫЕ И ЭМИССИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПАКТНОГО
ИСТОЧНИКА АТОМАРНЫХ И МОЛЕКУЛЯРНЫХ ИОНОВ ВОДОРОДА**

*Алексей Сергеевич Бугаев¹, Василий Иванович Гушенец¹,
Ефим Михайлович Окс^{1,2}, Максим Валентинович Шандриков^{1a}*

¹ Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия, 634055, Томск, пр. Академический, 2/3

² Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Россия, 634050, Томск, пр. Ленина, 40

^a shandrikov@opec.hcei.tsc.ru

АННОТАЦИЯ

В статье дано описание конструкции и приведены разрядные и эмиссионные характеристики компактного источника ионов водорода на основе разряда с полым катодом, иницируемым отражательным разрядом типа Пеннинга. Геометрия разрядной системы представляет собой модификацию достаточно известной конструкции генератора плазмы, используемого в плазменных источниках электронов и источниках «распыляющих» ионов. Разрядная система источника ионов работает непрерывном режиме, но способна работать и в импульсно-периодическом. Извлечение и формирование ионного пучка осуществляется трехэлектродной оптической системой с углом раствора конуса электродов 90° . Конструкция ионно-оптической системы позволяет работать при ускоряющих напряжениях до 30 кВ и формировать пучки протонов и молекулярных ионов водорода с плотностями тока более 100 mA/cm^2 . В непрерывном режиме получен полный ток ионного пучка 14 мА при токе разряда 450–500 мА и диаметре эмитирующего отверстия 3,5 мм. С использованием сепаратора на основе секторного электромагнита впервые для источников этого типа были получены детальные обзорные масс-спектры ионного пучка. Разрядная система генератора плазмы, результаты исследований которой представлены в статье, отличается простотой и компактностью конструкции, значительным ресурсом непрерывной работы, высокой надежностью, низкими эксплуатационными расходами и др.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Отражательный разряд; разряд с осциллирующими электронами; разряд с полым катодом; источник атомарных и молекулярных ионов; генератор плазмы.

Введение

Разряд с осциллирующими электронами в магнитном поле благодаря простоте конструкции разрядной системы и ее высокой надежности является одним из наиболее широко используемых в различных отраслях науки и техники. Типичная геометрия разрядной системы состоит из анода (в виде кольца или цилиндра), помещенного между двумя плоскими катодами. Для удержания осциллирующих между катодами электронов внутри разрядного устройства и увеличения их ионизационной способности приложено осевое магнитное поле, направленное от одного катода к другому. Такой тип устройства с осциллирующими электронами и холодными плоскими катодами был предложен Пеннингом в качестве датчика давления в высоковакуумных установках [1], а позднее им же модифицированный вариант был использован как ионный источник в генераторе нейтронов [2]. Недостатком источников

с холодными плоскими катодами является относительно высокое напряжение горения (свыше 700 В [3]) и, как следствие, высокая скорость распыления катодов. Использование в качестве первичного источника электронов разогретого до температуры термоэмиссии катода позволило существенно снизить напряжение горения разряда до нескольких сот вольт и ниже [4]. Однако несмотря на совершенствование термокатодного узла, замену прямонакального катода на термокатод косвенного накала, именно термокатод и ограничивает ресурс непрерывной работы плазмогенератора.

К настоящему времени разработано и исследовано много вариантов устройств на основе отражательного разряда с осциллирующими электронами, удовлетворяющих различным требованиям в зависимости от области применения [5–7]. Среди таких применений наиболее важным в настоящее время является применение ионных источ-

ников в медицинских ускорителях [8–11]. Основные медицинские приложения ускорителей ионов – это лучевая (протонная) и бор-нейтрон-захватная терапия онкологических заболеваний. К ионным источникам, предназначенным для медицинских приложений, предъявляется ряд специфических требований (например, такие, как высокая надежность, значительный ресурс непрерывной работы, безопасность и простота эксплуатации и др.) и связано это с тем, что облучение пациента не может быть прервано и потом снова возобновлено [11]. И тут возникает проблема, как создать ионный источник, удовлетворяющий выше указанным требованиям, при этом по разумной цене.

Увеличить ресурс работы ионного источника типа Пеннинга с накаливаемым катодом можно, заменив термокатод ненакаливаемым источником первичных электронов. В качестве ненакаливаемого катода может быть использован полый катод – электрод с цилиндрической полостью, через которую подается плазмообразующий газ. Использование полого катода с малой апертурой способствует формированию неоднородной плазмы с повышенной плотностью на оси системы. Пеннинговская разрядная система с холодным полым катодом нашла применение в плазменных источниках электронов [12, 13] и источниках «распыляющих» ионов [14–16]. Несмотря на высокую степень изученности процессов генерации плазмы в отражательном разряде с полым катодом и большую номенклатуру ионных источников, основанных на этом разряде, в доступной литературе информация по генерации водородной плазмы, формированию пучков ионов водорода – протонов и молекулярных, и в особенности данные, касающиеся массового состава ионного пучка, остаются крайне ограниченными.

С целью восполнения этого пробела были проведены экспериментальные исследования, и некоторые полученные результаты этих исследований приводятся в этой статье.

1. Конструкция ионного источника и результаты экспериментов

Ионный источник на основе отражательного разряда (разряда с осциллирующими электронами) с полым катодом состоит из нескольких основных частей: разрядной системы с осциллирующими электронами (генератора плазмы), ионно-оптической системы (ИОС) извлечения и предварительного формирования ионного пучка. Схема разрядной системы с ИОС приведена на рис. 1, а. Конструкция плазмогенератора источника ионов очень проста и включает три электрода: полый и отражательный катоды и цилиндрический анод. Магнитное поле с индукцией $0.06 \div 0.1$ Т создается кольцевыми неодимовыми магнитами. Полый и отражательный катоды являются элементами магнитной цепи и служат полюсными наконечниками. Катоды изготовлены из магнитомягкой стали, а анод изготовлен из немагнитной нержавеющей стали. Для отвода тепловой мощности все электроды генератора плазмы имеют каналы для прокачки охлаждающей жидкости – воды.

Отражательный катод является эмиттерным (иногда его называют плазменным) электродом, так как эмиссия ионов осуществляется с границы плазмы, проникающей через отверстие диаметром 3,5 мм в катоде в небольшую тороидальную полость – экспандер. Система извлечения и формирования пучка трехэлектродная: плазменный электрод, супрессор и заземленный (ускоряющий) электрод. Ускоряющее напряжение (U_{acc}) прикладывается между плазменным и заземленным электродами. На супрессор, одно из предназначений которого – подавление электронного тока из канала транспортировки ионного пучка, подается отрицательное относительно заземленного электрода напряжение величиной не более $0,1 \times U_{acc}$. Угол раствора конуса электродов оптической системы 90 градусов. За основу геометрии эмиссионной области плазменного электрода выбрана конструк-

ция вставки в отражательный катод, предложенная А. П. Семеновым [15, 16]. Размеры разрядной системы близки к размерам плазмогенератора, используемого для генерации «распыляющих» ионов [14].

Полый катод выполнен в виде сменной вставки, отношение длины полости к ее диаметру выбрано близким к 10 [12]. Разряд в полой катодной полости инициируется отражательным разрядом в результате проникновения плазмы из анодной области разряда. Вольтамперные характеристики разряда и их зависимость от давления приведены на рис. 1, б. Плазмообразующий газ (водород) подается в катодную полость. Приведенные величины давления – это давление, измеренное в области транспортировки ионного пучка сразу за ускоряющим электродом.

При относительно небольших разрядных токах в электродной системе плазмогенератора горит только разряд с осциллирующими электронами. При некотором пороговом токе разряда, который зависит от величины напу-

ска (и соответственно давления в разрядной области) рабочего газа (рис. 1, б), происходит зажигание разряда в катодной полости, что сопровождается либо снижением напряжения горения, если источник питания работает в режиме стабилизации тока, либо резким ростом разрядного тока при работе источника питания в режиме стабилизации напряжения. Приведенные вольтамперные характеристики разряда сняты с использованием блока питания, работающего в режиме стабилизации тока, поэтому в экспериментах мы могли достаточно точно определить пороговый ток возбуждения разряда в катодной полости (эффект полого катода). Увеличение давления приводит к снижению величины разрядного тока, при которой наблюдается эффект полого катода. Зажигание разряда с полым катодом приводит к формированию неоднородной плазмы с повышенной ее плотностью на оси, в том числе в области эмиссии, что, как известно, приводит к росту плотности тока извлекаемых частиц [12, 13].

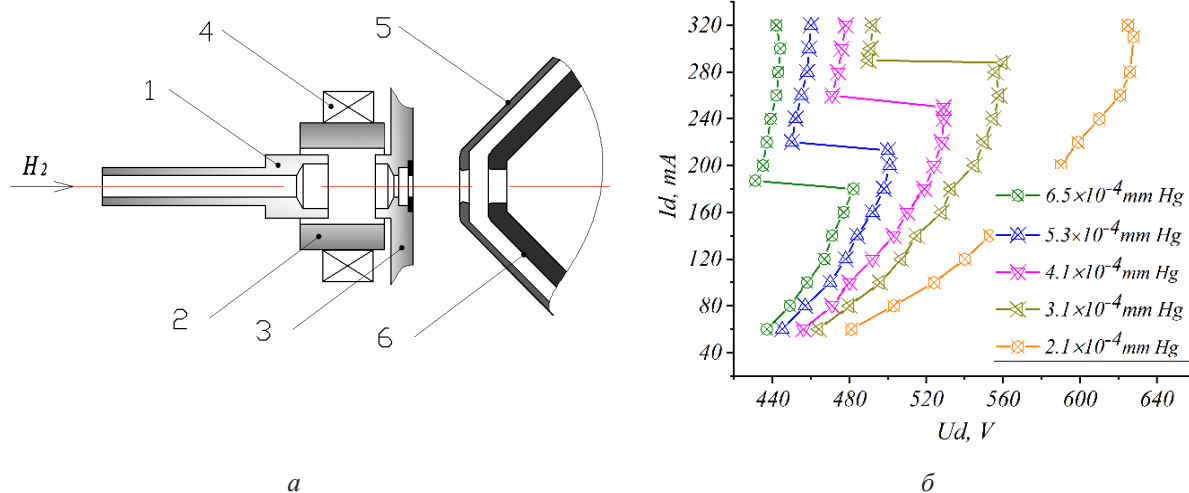


Рис. 1. Схема ионного источника (а) и вольтамперная характеристика разряда (б) в зависимости от давления плазмообразующего газа:

1 – полый катод, 2 – анод, 3 – отражательный катод, 4 – магнит NbBFe, 5 – супрессор, 6 – ускоряющий (заземленный) электрод

Fig. 1. Scheme of the ion source (a) and current-voltage discharge characteristic (б) as a function of the plasma-forming gas pressure:

1 – hollow cathode, 2 – anode, 3 – reflective cathode, 4 – NbBFe magnet, 5 – suppressor, 6 – accelerating (grounded) electrode

Зависимости тока в ускоряющем промежутке (I_{acc}) и ионного тока (I_{ion}) от ускоряющего напряжения, приведенные на рис. 2, получены при давлении водорода $3,9 \times 10^{-4}$ мм рт. ст., разрядном токе 400 мА и напряжении на супрессоре 3 кВ. Такое поведение тока I_{acc} связано с тем, что при малых ускоряющих напряжениях плазма проникает в ускоряющий промежуток, и это приводит к бомбардировке ионами электрода-супрессора и увеличению полного тока за счет ионно-электронной эмиссии с последнего. Измерения тока I_{acc} проводились в высоковольтной цепи, а ионный ток регистрировался с помощью стандартного для источников ионов цилиндра Фарадея. При обработке результатов измерения тока ускоряющего промежутка учитывалась утечка тока в системе водяного охлаждения электродов плазмодгенератора.

Важной характеристикой практически любого плазменного эмиттера ионов является компонентный состав извлекаемого ионного пучка. Измерение состава ионного пучка выполнялось с использованием сепаратора с 90° секторным электромагнитом и радиусом центральной орбиты 36 см. Для того, чтобы за одно измерение зарегистрировать весь массзарядовый состав пучка, на обмотку электромагнита подавался ток, изменяющийся во времени. Время изменения (нарастания) тока от нулевого значения (или некоторого заданного) до максимального (значение которого тоже задавалось) выбрано от 4 до 8 секунд. Запись масс-спектра осуществлялась с использованием осциллографа фирмы Tektronix – DPO4034 с длинной записи до 10 млн точек, что позволяет сохранять длинные по времени сигналы при сохранении высокого разрешения. На рис. 3 приводится обзорный масс-спектр ионного пучка и характерная форма токового сигнала одной из составляющих пучка с коллектора. Наличие почти плоской вершины на осциллограмме (рис. 3, б) является свидетельством того, что весь ток составляющей ионного пучка (в данном случае ионов молекулярного водорода) регистрируется коллектором цилиндра Фарадея.

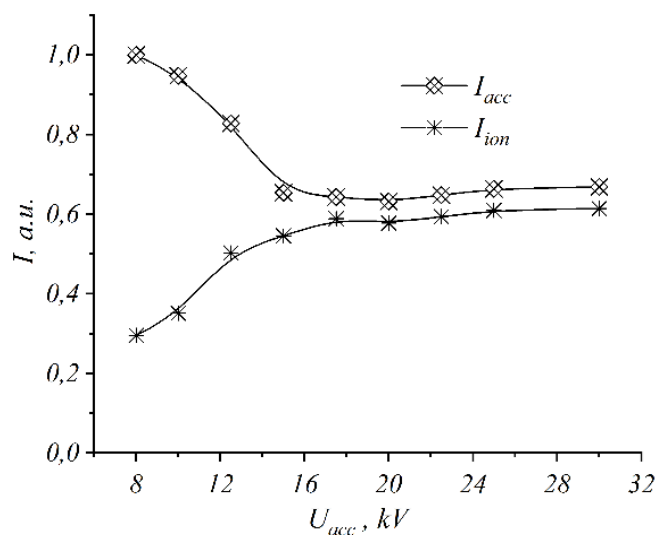


Рис. 2. Зависимость тока в ускоряющем промежутке (I_{acc}) и ионного тока (I_{ion}) от ускоряющего напряжения

Fig. 2. Dependence of the current in the accelerating gap (I_{acc}) and the ion current (I_{ion}) on the accelerating voltage

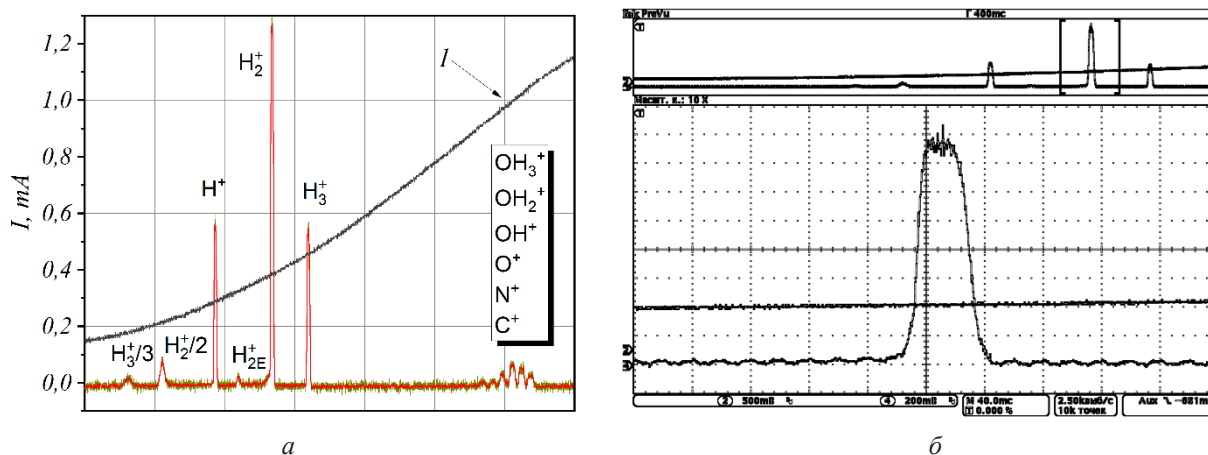


Рис. 3. Массовый состав ионного пучка (а) и характерная форма осциллограммы пика ионов H_2^+ (б) при давлении $3,9 \times 10^{-4}$ мм рт. ст., разрядном токе 370 мА и ускоряющем напряжении 30 кВ.
Линия I – сигнала с датчика Холла в магнитной системе

Fig. 3. Mass composition of the ion beam (а) and the characteristic shape of the H_2^+ peak (б) at a pressure of 3.9×10^{-4} mm Hg, a discharge current of 370 mA and an accelerating voltage of 30 kV.
Wave I – Hall sensor signal of the magnetic system

Основными составляющими пучка являются ионы водорода: H^+ , H_2^+ , H_3^+ . Также в ионном пучке присутствуют некоторые другие компоненты, которые могут рождаться как в плазме водородного разряда, так и при транспортировке ионов пучка. Так компоненты пучка, условно обозначенные на рисунке как « $H_3^+/3$ » и « $H_2^+/2$ », появились в его составе в результате диссоциации молекулярных ионов H_3^+ и H_2^+ при транспортировке пучка до входа в сепаратор. Ионы OH_3^+ , OH_2^+ и OH^+ образуются в разряде за счет реакций с напускаемым рабочим газом (молекулярным водородом) и ионами H_3^+ [17, 18]. Находящийся левее основного пик молекулярных ионов H_{2E}^+ представляет ту незначительную часть ионов, которые попадают в ускоряющий промежуток из приосевой области, где потенциал ниже, чем потенциал плазмы в остальном объеме [19]. Максимальный суммарный вклад примесных ионов во всех экспериментах не превышал 10%.

Как показали эксперименты, на величину тока ионного пучка, в том числе и на величину тока ионной эмиссии, а также абсолютные значения составляющих масс-спектра пучка оказывает сильное влияние давление рабочего газа. Снижение давления приводит к росту извлекаемого из плазмы разрядного

устройства ионного тока (рис. 4). Максимальное значение тока ионной эмиссии достигается при некотором минимальном давлении, ниже которого эффект полого катода не наблюдается вплоть до 500 мА разрядного тока. Возможным объяснением этому является уменьшение потерь в ускоряющем промежутке, а также изменение скоростей различных процессов в разрядной области генератора плазмы, что может, в свою очередь, приводить к изменению ее зарядового и компонентного состава. Внутри разрядной области во время функционирования разряда непрерывно происходят процессы, связанные с ионизацией газа электронами, диссоциацией молекул газа; имеет место уход ионов на стенки разрядной камеры, адсорбция и десорбция атомов и молекул. Поскольку при существующих в экспериментах рабочих давлениях газа ($\sim 0,01$ мм рт. ст. [20]) в разрядной камере плазмогенератора длина свободного пробега молекул H_2 (~ 1 см) сравнима с геометрическими размерами разрядного промежутка, то при снижении давления концентрация нейтральных молекул на оси окажется выше, чем вблизи анодной стенки, и это будет способствовать росту концентрации плазмы вблизи оси, и в том числе в области эмиссии.

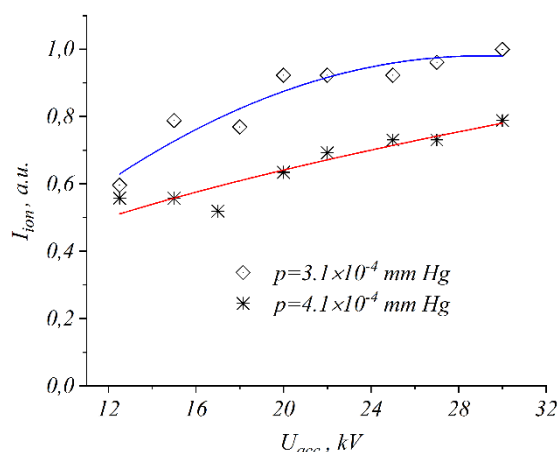


Рис. 4. Эмиссионные характеристики и влияние давления на их поведение. Условия эксперимента: ток разряда 450 мА, максимальная величина тока ионного пучка 11,5 мА при 30 кВ и давлении $4,1 \times 10^{-4}$ мм рт. ст

Fig. 4. Emission characteristics and influence of pressure on their behavior. Experimental treatment: discharge current 450 mA, maximum ion beam current 11.5 mA at 30 kV and pressure 4.1×10^{-4} mm Hg

Снижение давления приводит к уменьшению потерь при транспортировке пучка по ионопроводу сепаратора, что вполне понятно, а также к перераспределению относительного содержания ионов H^+ , H_2^+ , H_3^+ (рис. 5). Изменение давления слабо влияет на величину токов H^+ , H_3^+ , тогда как ток молекулярных ионов H_2^+ увеличивается почти в два раза. Результаты расчетов, приведенные в [6], показывают, что ток ионов H_3^+ растет

практически линейно с увеличением давления. Поэтому уменьшение транспортных потерь ионов H_3^+ и, следовательно, увеличение тока этих ионов при снижении давления почти полностью компенсируется уменьшением генерации их в плазме разряда. Тогда как с ионами H_2^+ дело обстоит совершенно иначе: по данным той же работы [6], снижение рабочего давления приводит к увеличению H_2^+ в плазме водородного разряда.

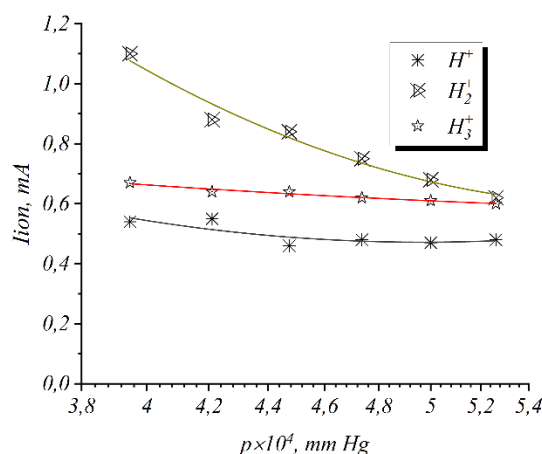


Рис. 5. Поведение составляющих ионного пучка с изменением давления рабочего газа

Fig. 5. Behavior of the ion beam components with the pressure change of the working gas

Другим важным фактором, влияющим на массовый состав ионного пучка, является величина разрядного тока, а вернее, плотность тока в столбе разряда. С ростом разрядного тока увеличивается протонная составляющая, но в гораздо большей степени растет ток молекулярных ионов H_2^+ . Так, при увеличении тока с 370 мА до 500 мА рост протонной компоненты составил ~23%, а молекулярная составляющая тока выросла на ~43%. Что касается ионов H_3^+ , то ток этих ионов с увеличением разрядного тока снизился на 18%.

Выводы

В результате экспериментальных исследований разрядной системы ионного источника на основе отражательного разряда с полым катодом получены детальные результаты по компонентному составу ионного пучка, извлекаемого из плазмы водородного разряда. Основные составляющие масс-спектра сепарированного пучка (H^+ , H_2^+ , H_3^+) соотносятся как 0,27:0,52:0,21. Доля примесных ионов (OH_3^+ , OH_2^+ , OH^+ , O^+ и др.) не превышает 10%.

Благодарности / Acknowledgments

Исследования поддержаны в рамках государственного задания Института сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, проект FWRM-2021-0006.

The work was funded within the framework of the state task for the Institute of High Current Electronics (the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences), Tomsk, project No. FWRM-2021-0006.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Penning F. M. Ein neues manometer für niedrige gasdrucke, insbesondere zwischen 10^{-3} und 10^{-5} mm // Physica. 1937. V. 4, Iss. 2. P. 71–75. DOI: 10.1016/s0031-8914(37)80123-8.
2. Penning F. M., Moubis J. H. A. Eine Neutronenröhre ohne Pumpvorrichtung // Physica. 1937. V. 4, Iss. 11. P. 1190–1199. DOI: 10.1016/S0031-8914(37)80178-0.
3. Gavin B. F. PIG ion sources. The Physics and Technology of Ion Sources. I. G. Brown (ed.). New York: John Wiley & Sons, Inc., 1998. P. 180–201.
4. Bennett J. R. J. A Review of PIG sources for multiply charged heavy ions // IEEE Nuc. Sci. 1972. V. 19, Iss. 2. P. 48–68. DOI: 10.1109/TNS.1972.4326630.
5. Huashun Zh. Ion Sources. Springer Berlin, Heidelberg, 1999. P. 476.
6. Семашко Н. Н., Владимиров А. Н., Кузнецов В. В., Кулыгин В. М., Панасенков А. А. Инжекторы быстрых атомов водорода. М.: Энергоиздат, 1981. 168 с.
7. Каретников Д. В., Сливков И. Н., Тепляков В. А., Федотов А. П., Шембель Б. К. Линейные ускорители ионов. М.: Госатомиздат, 1962. 208 с.
8. Muramatsu M., Kitagawa A. A review of ion sources for medical accelerators (invited) // Rev. Sci. Instrum. 2012. V. 83, Iss. 2. Article number 02B909. DOI: 10.1063/1.3671744.
9. Kitagawa A., Fujita T., M. Muramatsu M., Biri S., Drentje A. G. Review on heavy ion radiotherapy facilities and related ion sources (invited) // Rev. Sci. Instrum. 2010. V. 81, Iss. 2. Article number 02B909. DOI: 10.1063/1.3268510.
10. Савченко О. В. Малогабаритные ускорители для протонной терапии. Сообщение Объединенного института ядерных исследований № P9-2009-35. Дубна: Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований, 2009. 23 с.
11. Gammino S. Ion Sources for Medical Applications // CERN Yellow Reports: School Proceedings CERN-2017-004-SP. 2017. V. 1. P. 59 – 70. DOI: 10.23730/CYRSP-2017-001.59.
12. Крейнделъ Ю. Е. Плазменные источники электронов. М.: Атомиздат, 1977. 144 с.
13. Источники электронов с плазменным эмиттером. Под ред. Ю. Е. Крейнделя. Новосибирск: Наука, 1983. 120 с.
14. Семенов А. П. Пучки распыляющих ионов: получение и применение. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 1999. 207 с.
15. Семенов А. П. Плазменный источник ионов // ПТЭ. 1984. № 5. С. 23–24.
16. Семенов А. П. Генерирование сильноточных ионных пучков в источниках ионов на основе разряда с холодным полым катодом // ПТЭ. 1993. № 5. С. 128–133.
17. Herbst E., Klemperer W. The Formation and Depletion of Molecules in Dense Interstellar Clouds // Astrophys. J. 1973. V. 185, Iss. 2. P. 505–533. DOI: 10.1086/152436.
18. Herbst E. The astrochemistry of H_3^+ // Phil. Trans. R. Soc. Lond. A. 2000. V. 358. P. 2523–2534. DOI: 10.1098/rsta.2000.066.
19. Мамедов Н. В., Щитов Н. Н., Колодко Д. В., Сорокин И. А., Синельников Д. Н. Разрядные характеристики плазменного источника Пеннинга // Журнал технической физики. 2018. Т. 88, № 8. С. 1164–1170. DOI: 10.21883/JTF.2018.08.46304.2396.
20. Груздев В. А., Крейнделъ Ю. Е., Троян О. Е. Иницирование разрядов низкого давления с холодным полым катодом в генераторах плазмы для ПИЭЛ // Источники электронов с плазменным эмиттером. Новосибирск: Наука, 1983. С. 5–14.