

УДК 537.534.2
EDN: KLWGSP

PACS: 07.77.Ka

Компактный импульсный источник протонов

В. И. Гушенец, А. С. Бугаев, Е. М. Окс

Описана конструкция и принцип работы импульсного источника протонов на основе отражательного разряда типа Пеннинга с холодным полым катодом. Газоразрядные системы с полым катодом, имеющие малую входную апертуру, обеспечивают формирование неоднородной плазмы с повышенной плотностью на оси разрядной камеры и в области эмиссионного электрода и при этом отличаются относительно низким напряжением горения. Такая разрядная система в полной мере отвечает требованиям, предъявляемым к генераторам плазмы для источников пучков заряженных частиц с высокой плотностью тока. Приведены результаты исследований по влиянию ключевых параметров разрядной системы: давления рабочего газа, магнитной индукции, геометрии полого катода на разрядные и эмиссионные характеристики источника.

Ключевые слова: ионный источник, источник протонов, полый катод, отражательный разряд, генератор плазмы.

DOI: 10.51368/1996-0948-2024-4-27-33

Введение

Газоразрядные системы с холодным полым катодом и малой входной апертурой катодной полости, используются в источниках заряженных частиц для генерации пучков с высокой плотностью тока [1, 2]. При низких давлениях и относительно малых размерах диаметра полого катода (несколько мм) зажигание разряда в катодной полости затруднено [3] и для инициирования разряда требуется дополнительный генератор плазмы. Такой генератор может быть расположенным как

внутри полости, так и вне ее. В качестве внешнего плазмогенератора могут быть использованы, например, разряды в скрещенных магнитном и электрическом ($E \times H$) полях, которые стабильно зажигаются и горят при очень низких давлениях. Именно поэтому такие разряды широко используются в вакуумметрах в качестве датчика давления. В импульсном источнике протонов, результаты исследования которого приведены в этой статье, для инициирования разряда в полном катоде используется разряд в скрещенных $E \times H$ полях с осцилляцией электронов – отражательный разряд типа Пеннинга. Он представляет собой трехэлектродную газоразрядную ячейку, состоящую из двух катодов и полого цилиндрического анода. В такой ячейке в одном из катодов выполнена полость с определенным соотношением диаметра к длине, а во втором катоде имеется отверстие, через которое осуществляется извлечение заряженных частиц. Плазмогенераторы с такой геометрией разрядной системы используются в плазменных источниках электронов для получения пучков с высокой яркостью [4] и в источниках «распыляющих» ионов [5].

Гушенец Василий Иванович, с.н.с., к.ф.-м.н.

E-mail: gvi@opee.hcei.tsc.ru

Бугаев Алексей Сергеевич, н.с., к.ф.-м.н.

E-mail: bugaev@opee.hcei.tsc.ru

Окс Ефим Михайлович, зав. лабораторией, д.т.н.

E-mail: oks@opee.hcei.tsc.ru

Институт сильноточной электроники СО РАН.

Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3.

Статья поступила в редакцию 4.06.2024

После доработки 20.06.2024

Принята к публикации 9.07.2024

Шифр научной специальности: 2.2.1

© Гушенец В. И., Бугаев А. С., Окс Е. М., 2024

В статье приведены характеристики разрядной и эмиссионной систем источника ионов водорода, который был разработан для оценки возможностей эффективного использования отражательного разряда с полым катодом для генерации протонов. Интерес к источникам ионов водорода и особенно атомарным ионам водорода (протонам) обусловлен широким применением их в ускорительной технике. Среди таких применений наиболее важными в настоящее время является применение источников в медицинских ускорителях. Основными медицинскими приложениями ускорителей ионов являются лучевая и бор-нейтрон-захватная терапия онкологических заболеваний. К ионным источникам, предназначенным для медицинских приложений, предъявляется ряд специфических требований (например, такие как надежность, безопасность и простота эксплуатации и др.) и связано это в первую очередь с тем, что облучение пациента не может быть прервано и потом снова возобновлено [6]. В достаточной мере этим требованиям удовлетворяют источники на основе отражательного разряда с полым катодом, которые отличаются высокой эффективностью, надежностью и простотой конструкции, что доказано многолетней их эксплуатацией в источниках электронов [3, 4].

Конструкция и принцип работы ионного источника

Электродная схема источника ионов на основе отражательного разряда типа Пеннинга с полым катодом представлена на рисунке 1. Инициирование разряда в катодной полости 1 происходит за счет инжекции плазмы из отражательного разряда. Вначале при малых токах горит отражательный разряд в пеннинговской ячейке, образованной анодом 2 и торцевыми поверхностями отражательного 3 и полого 1 катодов. Для удержания осциллирующих электронов между катодами внутри анодной полости 2 и увеличения их ионизационной эффективности приложено осевое магнитное поле, которое создается набором из кольцевых магнитов 4. Катоды 1, 3 и детали их поддерживающие изготовлены из магнитомягкой стали и являются частью магнитной

цепи разрядной ячейки. При некоторой величине тока отражательного разряда происходит переход к разряду с полым катодом, что сопровождается резким снижением напряжения горения и ростом разрядного тока. Для выбранной геометрии полого катода и размеров разрядной ячейки в диапазоне давлений водорода $(0,9-1,5) \times 10^{-4}$ Торр значения тока перехода составляет 160–300 мА [7]. Полый катод выполнен в виде сменной вставки. Отношение длины полости к ее диаметру (3,5) выбрано близким к оптимальному [3] и равно 9. Разрядная область пеннинговской ячейки имеет малые размеры – расстояние между катодами равно 7 мм, внутренний диаметр цилиндрического анода равен 12 мм. Такой малый размер разрядной области выбран с целью получения высокой плотности разрядного тока – 1 А/см² и более. Основной режим работы разрядной системы экспериментального макета – импульсно-периодический с длительностью импульса в несколько миллисекунд и частотой повторения до 100 Герц.

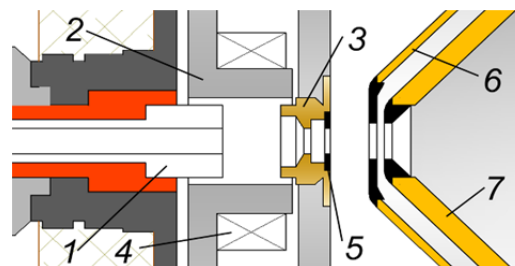


Рис. 1. Схема источника ионов на основе отражательного разряда с полым катодом: 1 – полый катод; 2 – анод; 3 – отражательный катод (плазменный электрод); 4 – магнит; 5 – эмиссионный электрод-вставка; 6 – экранирующий электрод (супрессор); 7 – ускоряющий (заземленный) электрод

Для извлечения ионов из разрядной плазмы использовалась трехэлектродная одноапертурная ионно-оптическая система, состоящая из эмиссионного электрода 5, экранирующего электрода 6 и ускоряющего электрода 7. Эмиссионный электрод-вставка и торцевые части экранирующего и ускоряющего электродов изготовлены из молибдена. Ускоряющий электрод заземлен, а электроды разрядной ячейки находятся под высоким (до 35 кВ) потенциалом. Экранирующий электрод находится под отрицательным потенциалом и типичные значения этого потенциала в экспери-

ментах были в пределах $3\div 6$ кВ. Регистрация тока пучка осуществлялась коллектором стандартной геометрии с антидинаatronной сеткой. Коллектор располагался на расстоянии 35 см от эмиссионного электрода. Перед коллектором установлен коллиматор с проходным отверстием диаметром 4 см.

Отбор ионов из разрядной плазмы осуществляется через отверстие эмиссионного электрода-вставки 5 в отражательном катоде (плазменном электроде) 3. За основу геометрии плазменного электрода взята конструкция, предложенная Семеновым А. П. [5]. Такая геометрия обеспечивает устойчивую фокусировку ионного пучка в широком диапазоне ускоряющих напряжений и эмиссионных токов. В этом электроде имеется экспандер – расширитель небольшого размера, сформированный дисками с проходными отверстиями диаметром 3 мм. В расширитель проникает плазма из разрядной области и в нем же формируется эмиссионная граница плазмы. При изменении ускоряющего напряжения или разрядного тока в достаточно широких пределах граница плазмы перемещается внутри расширителя, но ее профиль почти не изменяется. При такой конфигурации отражательного катода затруднено проникновение быстрых электронов из разряда, и они не оказывают заметного влияния на формирование эмиссионной границы плазмы [8]. Выбор размера эмиссионного отверстия – это своего рода компромисс между потребностью получения как можно большего значения тока эмиссии (при минимальном разрядном токе и требуемой для этого величины расхода газа) и необходимостью снижения давления как в области извлечения и формирования ионного пучка, так и в области его транспортировки. Относительно высокое давление в ускоряющем промежутке снижает электрическую прочность последнего, увеличивает рассеивание и потери пучка, при его транспортировке, а также изменяет массзарядовый состав ионного пучка [7] в результате диссоциации ионов H_2^+ и H_3^+ , что приводит к появлению ионов с энергией, равной половине и трети от ускоряющего напряжения. Поэтому важно, чтобы давление в разрядной ячейке было возможно меньшим. Напуск рабочего газа (молекулярного водорода) производился в катодную полость, а его регулировка и контроль

осуществлялись с помощью контроллера. В рабочем диапазоне давлений величина расхода газа варьировалась в пределах от 4 до $12 \text{ см}^3 \cdot \text{атм}/\text{мин}$. Давление измерялось ионизационным вакуумметром (MicroIon), установленным в области выхода пучка из ионно-оптической системы источника.

Все геометрические размеры ионной оптики (расстояние между электродами, толщина электродов и диаметры отверстий в них) выбраны исходя из требования по формированию пучка с минимальным углом расходимости для ионного тока $20\div 25$ мА и ускоряющего напряжения $30\div 35$ кВ. Для определения геометрических параметров разрядной системы были использованы рекомендации, приведенные в [1, 9].

Исследования ионного источника проводились на экспериментальном стенде, оборудованном сепаратором заряженных частиц на основе секторного магнита с вертикальным размером входной апертуры ионопровода 4,5 см. Вакуумный объем стенда откачивался двумя турбомолекулярными насосами с общей производительностью 1500 л/с в комбинации с механическими форвакуумными насосами.

Результаты экспериментов

Ключевыми параметрами ионного источника являются величина извлекаемого ионного тока, компонентный состав ионного пучка, расход рабочего газа, ускоряющее напряжение и др. Для источников с разрядом в скрещенных магнитном и электрическом полях важным параметром является величина и структура магнитного поля [10]. Так как разрядная система источника находится под потенциалом, равным ускоряющему напряжению, важно чтобы мощность, потребляемая разрядом и магнитной системой, была наименьшей, насколько это возможно. К факторам, оказывающим наибольшее влияние на свойства ионного источника, относятся – плотность разрядного тока и плотность ионного тока в эмиссионном отверстии. С повышением плотности тока разряда растет концентрация плазмы, и в большинстве разрядных систем растет протонная составляющая пучка.

Поскольку ионный источник является одним из основных элементов инжектора протонов, к нему предъявляются вполне определенные требования в отношении газовой и энергетической эффективности, т. е. должны быть подобраны оптимальная геометрия разрядной системы и параметры разряда, чтобы обеспечить получение требуемого ионного тока при минимальной мощности, выделяемой на электродах разрядной камеры, и минимальном давлении газа. Именно поэтому зависимость разрядного тока от напряжения на электродах (вольтамперная характеристика – ВАХ) и влияние на нее ключевых параметров разряда представляют большой практический интерес для разработчиков ионных источников. На рисунке 2 приведены характеристики разряда, на которых показано влияние магнитного поля, как одного из ключевых параметров. В исследуемой разрядной системе ионного источника магнитное поле регулируется набором из ограниченного числа постоянных магнитов. Использовались три набора магнитов, которыми на оси разрядной ячейки создавалось магнитное поле равное 0,066 Т, 0,077 Т и 0,11 Т.

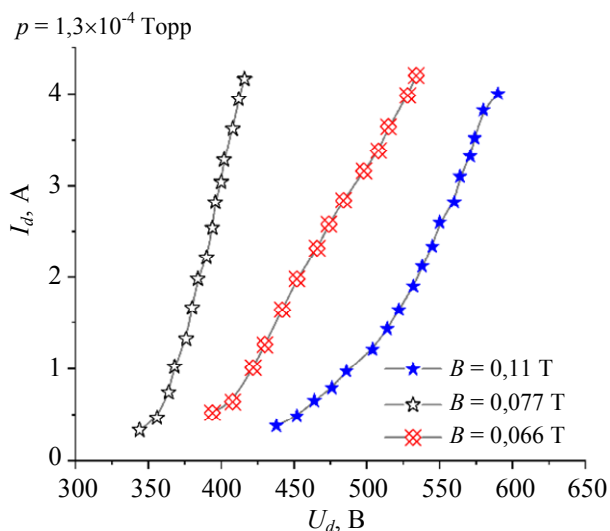


Рис. 2. Вольтамперные характеристики разряда и влияние магнитного поля. I_d – ток разряда; U_d – напряжения горения разряда; B – индукция магнитного поля; p – давление газа

Из приведенных характеристик видно, что разряд в магнитном поле 0,077 Т имеет наименьшие значения напряжения горения, а сама характеристика отличается наибольшей крутизной. Магнитное поле величиной 0,077 Т

близко к оптимальному значению, при котором в данной геометрии разрядной системы, для данного набора материалов электродов рассеиваемая мощность на электродах минимальна во всем рабочем диапазоне давлений и исследуемых разрядных токов.

Другим фактором, оказывающим значительное влияние на поведение ВАХ отражательного разряда, является давление рабочего газа. На рисунке 3 приведены характеристики разряда в интервале давлений $(0,9 \div 1,5) \times 10^{-4}$ Торр. Ограничение по верхнему пределу давления связано с ростом потерь пучка, а существование нижнего порога по давлению – с возникающими обрывами разрядного тока и, таким образом, невозможностью получить большие амплитуды. В конкретном случае, при давлении 10^{-4} Торр, начиная с токов $(2,5 \div 3)$ А разряд горит нестабильно, с частыми обрывами.

Уменьшение размера входной апертуры катодной полости (при этом диаметр полого катода оставался неизменным) с 3,5 до 2 мм, привело к существенному снижению напряжения горения разряда (рис. 3б), и одновременно, как показали исследования эмиссионных характеристик источника, к увеличению эмиссионного тока.

Как видно из приведенных на рисунке 3б характеристик изменился и характер некоторых характеристик разрядного тока. Снижение напряжения горения возможно связано с ростом давления во внутренней области полого катода. А рост эмиссионного тока происходит вследствие увеличения концентрации плазмы в приосевой области разрядной системы и эмиссионного отверстия, как результат контрагирования разряда.

Типичные эмиссионные характеристики – зависимость тока эмиссии I_{acc} от разрядного тока – приведены на рисунке 4. В экспериментах по исследованию эмиссионных характеристик мы ограничились максимальным значением разрядного тока в $2 \div 2,2$ А из-за значительного снижения тока I_{col} , регистрируемого коллектором. Как показали эксперименты сумма токов в цепи супрессора и ускоряющего электродов не превышала 2 мА при эмиссионном токе 50 мА, нарастая почти линейно с ростом разрядного тока, и представляют в основном ионный ток из плазмы кана-

ла транспортировки пучка. А падение токопрохождения вызвано увеличением угла расходимости пучка при токах эмиссии выше оптимальных [9], и в результате размер пучка превысил диаметр коллиматора. Отсутствие экспериментальных данных не позволило нам до начала исследований оценить возможные значения эмиссионного тока – эффективность излучения ионов из плазмы разрядной систе-

мы оказалась неожиданно высокой. Стремление увеличить разрядный ток, при неизменной геометрии ячейки, оправдано необходимостью увеличения доли протонов в извлекаемом пучке. Для разрядного тока близкого к 2,2 А, доля протонов в пучке достигла 40 %. Дальнейшее увеличение разрядного тока, при неизменной геометрии должно привести к дальнейшему росту протонной составляющей [9].

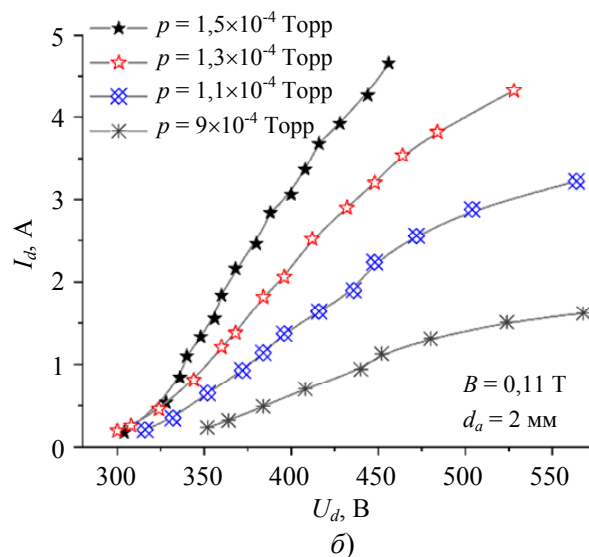
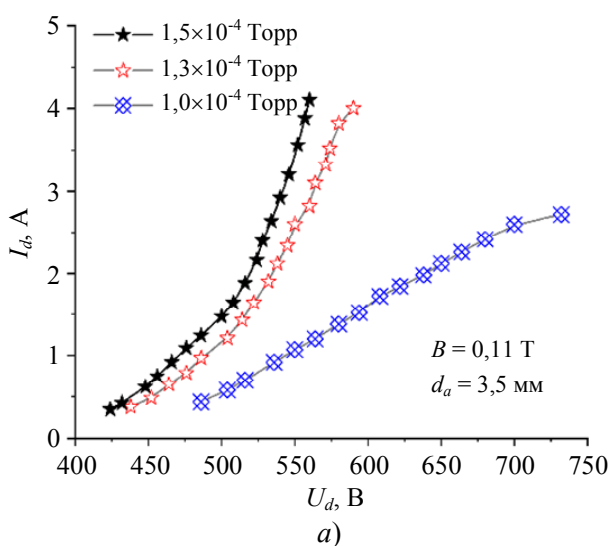


Рис. 3 Влияние на вольтамперную характеристику разряда давления рабочего газа и размера апертуры d_a полого катода

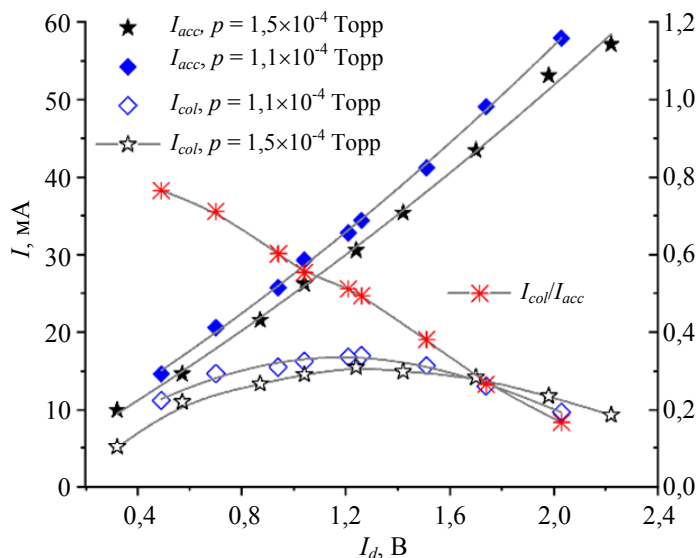


Рис. 4 Эмиссионные характеристики источника. Условия эксперимента: Ускоряющее напряжение 33 кВ, напряжение на супрессоре 6 кВ, магнитное поле $B = 0,11$ Т. Зависимость I_{col}/I_{acc} приведена для давления $1,1 \times 10^{-4}$ Торр

Компонентный состав ионного пучка является важной характеристикой практически любого источника ионов. В данном устройстве основными компонентами ионного пучка являются протоны H^+ (~40 %), ионы молекулярного H_2^+ (~52 %) и трехатомного H_3^+ (~8 %)

водорода без учета примесных ионов. Как показали измерения доля ионных примесей (OH_3^+ , OH_2^+ , OH^+ , O^+ и др.) незначительна [7].

Увеличение давления приводит к небольшому снижению эмиссионного тока – около 10 % (рис. 4). Так как отбор ионов осуществ-

ляется из приосевой области разряда, то снижение эмиссионного тока с ростом давления связывают со снижением концентрации плазмы в этой области, причины этого достаточно подробно описаны в статье [11]. В более слабом магнитном поле ($B = 0,077$ Т) зависимость эмиссионного тока от напуска рабочего газа значительно выросла, так увеличение давления с $1,1 \times 10^{-4}$ Торр до $1,3 \times 10^{-4}$ Торр привело к почти 20 % снижению тока эмиссии – с 50 мА до 40 мА при токе разряда 2 А.

Заключение

Приведены результаты исследований разрядных и эмиссионных характеристик импульсного источника протонов на основе отражательного разряда типа Пеннинга с холодным полым катодом в водороде в зависимости от ряда ключевых параметров: диаметра входной апертуры полого катода, давления рабочего газа и магнитного поля. Определена оптимальная величина индукции магнитного поля ($\sim 0,08$ Т), обеспечивающая минимальные значения напряжения горения разряда и, соответственно минимальную тепловую нагрузку конструктивных элементов ионного источника. Источник протонов на основе разряда такого типа выгодно отличается компактностью и конструктивной простотой. Источник обеспечивает высокую эффективность извлечения ионов из плазмы, при этом доля протонов в ионном пучке достигает 40 %. Дальнейшие исследования по оптимизации конструкции ионного источника и его параметров будут

направлены как на повышение полного тока ионного пучка, так и его протонного компонента.

Исследования поддержаны грантом Российского научного фонда, проект № 24-29-00271.

ЛИТЕРАТУРА

1. Forrester A. T. Large Ion Beams: Fundamentals of Generation and Propagation. – New York: John Wiley & Sons, Inc., 1988.
2. Mase H., Tanabe T., Ikahata T. / Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 1989. Vol. 37–38. № 2. P. 120–123.
3. Источники электронов с плазменным эмиттером / под ред. Крейнделю Ю. Е. – Новосибирск: Наука, 1983. С. 5.
4. Крейнделю Ю. Е. Плазменные источники электронов. – М.: Атомиздат, 1978.
5. Семенов А. П. Пучки распыляющих ионов: получение и применение. – Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 1999.
6. Gammino S. / Proceedings of the CAS-CERN Accelerator School “Accelerators for Medical Applications”. – Vösendorf, 2015. P. 59–70.
7. Bugaev A. S., Gushenets V. I., Oks E. M., Shandrikov M. V. / Materials. Technologies. Design. 2023. Vol. 5. № 12. P. 7–11.
8. Ковальский Г. А., Каретников Д. В., Меньшиков М. И., Плешивцев Н. В., Шембель Б. К. / Атомная энергия. 1980. № 5. С. 296–299.
9. Семашко Н. Н., Владимиров А. Н., Кузнецов В. В., Кулыгин В. М., Панасенков А. А. Инжекторы быстрых атомов водорода. – М.: Энергоиздат, 1981.
10. Семенов А. П., Батуев Б.-Ш. Ч. / Журнал технической физики. 1990. № 10. С. 171–173.
11. Galansky V. L., Gruzdev V. A., Osipov I. V., Rempe N. G. / J. Phys. D: Appl. Phys. 1994. Vol. 27. № 5. P. 953–961.

PACS: 07.77.Ka

Compact pulsed proton source

V. I. Gushenets, A. S. Bugaev and E. M. Oks

Institute of High Current Electronics, SB RAS
2/3 Akademicheskyy Ave., Tomsk, 634055, Russia
E-mail: gvi@opee.hcei.tsc.ru

Received 4.06.2024; revised 20.06.2024; accepted 9.07.2024

The design and operating principle of a pulsed proton source based on a Penning-type reflective discharge with a cold hollow cathode is described. Gas-discharge systems with a small

aperture hollow cathode ensure the formation of inhomogeneous plasma with increased density on the discharge chamber axis and in the emission electrode area, and are characterized by a relatively low discharge voltage. Such a discharge system fully meets the requirements for plasma generators of charged particle beam sources with high current density. The results of studies on the influence of key parameters of the discharge system: working gas pressure, magnetic field induction, geometry of the hollow cathode on the discharge and emission characteristics of the source are presented.

Keywords: ion source, proton source, hollow cathode, reflective discharge, plasma generator.

REFERENCES

1. Forrester A. T., Large Ion Beams: Fundamentals of Generation and Propagation, New York, John Wiley & Sons, Inc., 1988.
2. Mase H., Tanabe T. and Ikahata T., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. **37–38** (2), 120–123 (1989).
3. Plasma emitter electron sources / ed. Krindel' Ju. E., Novosibirsk, Nauka, 1983 [in Russian].
4. Kreindel' Ju. E., Plasma electron sources, Moscow, Atomizdat, 1978 [in Russian].
5. Semenov A. P., Sputtering ion beams: production and application, Ulan-Ude, BSC SD RAS, 1999 [in Russian].
6. Gammino S. Proc. of the CAS-CERN Accelerator School: Accelerators for Medical Applications. Vösendorf, 2015, pp. 59–70.
7. Bugaev A. S., Gushenets V. I., Oks E. M. and Shandrikov M. V., Materials. Technologies. Design **5** (12), 7–11 (2023) [in Russian].
8. Kovalsky G. A., Karetnikov D. V., Menshikov M. I., Pleshivtsev N. V. and Shembel B. K., Atomnaja Energija **49** (5), 296–299 (1980) [in Russian].
9. Semashko N. N., Vladimirov A. N., Kuznetsov V. V., Kulygin V. M. and Panasenkov A. A., Fast hydrogen atom injectors, Moscow, Atomizdat, 1981 [in Russian].
10. Semenov A. P. and Batuev B. Sh.-Ch., Zhurnal Tekhnicheskoi Phisiki **62** (10), 171–173 (1990) [in Russian].
11. Galansky V. L., Gruzdev V. A., Osipov I. V. and Rempe N. G., J. Phys. D: Appl. Phys. **27** (5), 953–961 (1994).