

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, МЕТАЛЛУРГИЯ

MATERIALS ENGINEERING, METALLURGY

УДК 537.533
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-3-285-291>

Поступила в редакцию 22.01.2020
Received 22.01.2020

Д. А. Антонович¹, В. А. Груздев¹, В. Г. Залесский², П. Н. Солдатенко¹

¹*Полоцкий государственный университет, Новополоцк, Республика Беларусь*

²*Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь*

**ПЛАЗМЕННЫЙ ИСТОЧНИК ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ
СОВМЕЩЕННЫХ ИОННО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ**

Аннотация. Одним из способов повышения эффективности реализации ионно-плазменных технологий воздействия на поверхности различных материалов является частичная или полная компенсация положительного заряда ионов в потоке или на обрабатываемой поверхности, для чего используются дополнительные эмитирующие системы, которые создают компенсирующие электронные потоки в разрядное пространство, ускоряющий промежуток или на обрабатываемую поверхность. Для реализации такого компенсирующего воздействия возможно применение плазменных источников заряженных частиц, способных при изменении полярности ускоряющего напряжения формировать пучки обоих знаков. Основная проблема при этом заключается в сложности достижения одновременно высокой эффективности эмиссии ионов и электронов, поскольку условия их эмиссии из плазмы существенно различаются. В данной статье предложена концепция и разработанная на ее основе конструкция макета мультиразрядного плазменного электронно-ионного источника для совместного или попеременного формирования электронных и ионных пучков. Показано, что в предложенной конструкции реализуется возможность повышения первеанса за счет компенсации объемного заряда частицами противоположного знака. Приведен ряд характеристик разработанного макета плазменного электронно-ионного источника (вольтамперные характеристики извлечения электронов и ионов) и показана его перспективность для дальнейшей разработки на его основе электронно-ионного источника для промышленного применения. Совмещенные или попеременные ионно-электронные пучки, формируемые в представленном источнике, могут быть использованы при реализации технологий нанесения тонкопленочных слоев металлов, полупроводников и диэлектриков для поддержания процессов ионизации и обеспечения устойчивого горения разряда, компенсации как объемного заряда в пучке, так и поверхностного на формируемой пленке.

Ключевые слова: плазменный источник заряженных частиц, электронно-ионное воздействие, электронные пучки, компенсированные ионные пучки

Для цитирования: Плазменный источник заряженных частиц для формирования совмещенных ионно-электронных пучков / Д. А. Антонович [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2020. – Т. 65, №3. – С. 285–291. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-3-285-291>

Dmitry A. Antonovich¹, Vladimir A. Gruzdev¹, Vitali G. Zalesski², Pavel N. Soldatenko¹

¹*Polotsk State University, Novopolotsk, Republic of Belarus*

²*Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*

PLASMA SOURCE OF CHARGED PARTICLES FOR THE FORMATION OF COMBINED ION-ELECTRON BEAMS

Abstract. One of the ways to increase the efficiency of the implementation of ion-plasma technologies of exposure to the surfaces of various materials is partial or full compensation of the positive charge of ions in the stream or on the treated surface, for which additional emitting systems are used that create compensating electron flows in the discharge space, accelerating gap or on the processed surface. It was previously shown that for the implementation of such a compensating effect, it is possible to use plasma sources of charged particles, capable of forming beams of both signs when the polarity of the accelerating voltage is changed. The main problem in this case is the difficulty in achieving simultaneously high emission efficiency of ions and electrons, since the conditions for their emission from plasma are significantly different. This article proposes a concept and a design developed on its basis for a prototype of a multi-discharge plasma electron-ion source for the joint or alternating formation of electron and ion beams. It is shown that the proposed design realizes the possibility of

increasing the perveance by compensating for the space charge by particles of the opposite sign. A number of characteristics of the developed model of a plasma electron-ion source (current-voltage characteristics of the extraction of electrons and ions) are presented and its prospects for further development of an electron-ion source for industrial use on its basis are shown. Combined or alternating ion-electron beams formed in the presented source can be used to implement the technology of applying thin-film layers of metals, semiconductors, and dielectrics to maintain ionization processes and ensure stable discharge burning, compensation of both the space charge in the beam and the surface charge on the formed film.

Keywords: plasma source of charged particles, electron-ion influence, electron beams, compensated ion beams

For citation: Antonovich D. A., Gruzdev V. A., Zaleski V. G., Soldatenko P. N. Plasma source of charged particles for the formation of combined ion-electron beams. *Vestsi Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2020, vol. 65, no. 3, pp. 285–291 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-3-285-291>

Введение. Одним из механизмов повышения эффективности ионно-плазменных технологий является частичная или полная компенсация положительного заряда ионов в потоке или на обрабатываемой поверхности [1]. Для компенсации, как правило, используются дополнительные эмиттирующие системы, создающие компенсирующие электронные потоки в разрядное пространство, ускоряющий промежуток или на обрабатываемую поверхность. Наибольшее распространение в технологических магнетронных системах высокой мощности получили сильноточные твердотельные накаливаемые эмиттеры электронов, обеспечивающие устойчивое горение разряда или компенсацию объемного заряда в пучке [2]. В условиях интенсивных ионных потоков ресурс таких эмиттеров ограничен вследствие усиленной ионной бомбардировки, а сами накальные эмиттеры отличаются высоким энергопотреблением, инерционностью и низкой эффективностью [3]. Поэтому создание безнакальных компенсационных эмиттеров электронов остается актуальным.

Известно применение в качестве компенсирующих источников разрядных систем с полым катодом [1, 3]. Однако в данных системах следует учитывать взаимное влияние магнитных полей этих источников для обеспечения высокой эффективности технологического процесса, а также необходимо согласование систем электропитания и управления с параметрами ионного и электронного потоков, формируемых в независимых источниках.

В то же время низкоэнергетичные электронные пучки могут применяться самостоятельно или для ассистирующего термического воздействия на подложку для интенсификации плазмохимических процессов и повышения скорости диффузионных процессов при формировании покрытий. Поэтому для ряда технологий может представлять интерес воздействие не только частично или полностью компенсированными ионными пучками, но и попеременное (теплофизическое электронное и модифицирующее ионное) пучками заряженных частиц обоих знаков заряда.

Для реализации такого воздействия перспективным инструментом представляются плазменные источники заряженных частиц [3–6], не имеющие накаливаемых элементов. Несмотря на то что эмиттером заряженных частиц в таких системах является плазма и при изменении полярности ускоряющего напряжения можно формировать пучки обоих знаков, одновременно высокой эффективности эмиссии в таких системах достичь сложно, поскольку условия эмиссии ионов и электронов из плазмы существенно различаются.

Было показано [1, 2], что поскольку условия формирования, прежде всего по давлению, ионных пучков в известных системах магнетронного типа близки к условиям формирования электронных пучков в системах с плазменным эмиттером, то возможно создание комбинированных источников, обеспечивающих формирование как электронных, так и ионных пучков [7]. Авторами данной статьи предложена концепция и разработанная на ее основе конструкция единой мультиразрядной структуры, которая способна формировать совмещенные или попеременные ионно-электронные пучки, а также представлены некоторые экспериментальные параметры таких пучков.

Экспериментальный макет источника заряженных частиц. Разработанный макет электронно-ионного источника, эскиз электродной структуры которого представлен на рис. 1, представляет собой генератор эмиттирующей плазмы, формируемой в объеме, который ограничен внутренними поверхностями катодов 2 и 4, анода 3 и эмиттерного электрода 5 (разрядная камера I). Электроды 6 и 7 создают промежуток ускорения электронов, где формируется поверхность плазмы, эмиттирующая электроны. Электроды 8–12 образуют газоразрядную структуру, формирующую плазму, которая является источником распыляющих ионов. Данная структура состоит из двух соединенных последовательно (вдоль оси) газоразрядных ячеек «пеннинговского» типа (II и III) (Penning F. M.

Coating by cathode disintegration. US Patent 2,146,025 assignor to N.V. Philips', Gloeilampenfabrieken, Eindhoven, Netherlands; 1939). Элементы 9 и 11 являются анодами разрядных ячеек; элементы 8, 10 и 12 – катодами, которые одновременно используются в качестве полюсных наконечников постоянных магнитов, обеспечивающих осцилляцию электронов между катодами газоразрядной камеры II.

Одновременно с этим магнитное поле, формируемое катодами 8, 10 и 12, образует магнитную фокусирующую систему для ускоренного электронного пучка, который распространяется вдоль оси газоразрядной структуры II до выхода из источника ионно-электронного пучка в технологическую камеру. Между электродами 12 и 14 прикладывается напряжение, ускоряющее ионы до требуемой технологией энергии распыляющих ионов. В то же время в этом промежутке (между электродами 12 и 14) осуществляется торможение пучка электронов, ускоренных в промежутке между электродами 6 и 7. Эмитирующая ионы поверхность плазмы, формирующаяся между электродами 12 и 14, определяет траектории как ионов, так и электронов в пространстве дрейфа электронно-ионного пучка до распыляемой мишени, а значит, определяет распределение плотностей ионного и электронного тока по поверхности мишени.

На рис. 2 представлена схема подключения блоков питания к электродам макета. Независимые системы электропитания и ускорения для каждой разрядной камеры единой структуры позволяют

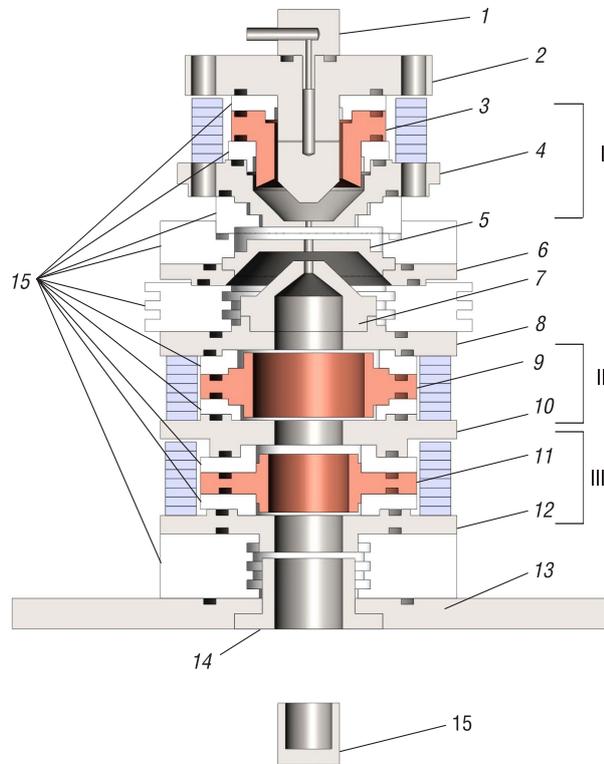


Рис. 1. Электродная структура разработанного макета электронно-ионного источника со скрещенными $E \times H$ полями: 1 – штуцер для напуска плазмообразующего газа; 2 – внутренний катод; 3 – главный анод; 4 – внешний катод; 5 – эмиттерный электрод; 6 – вспомогательный анод; 7 – ускоряющий электрод; 8, 10, 12 – катоды; 9, 11 – аноды; 13 – фланец для установки структуры на рабочую камеру; 14 – согласующий электрод; 15 – изоляторы; I, II, III – области разрядных камер

Fig. 1. Appearance and internal structure of the developed layout electron-ion source with crossed $E \times H$ fields: 1 – fitting for plasma gas inlet; 2 – internal cathode; 3 – the main anode; 4 – external cathode; 5 – emitter electrode; 6 – auxiliary anode; 7 – accelerating electrode; 8, 10, 12 – cathodes; 9, 11 – anodes; 13 – flange for mounting the structure on the working chamber; 14 – matching electrode, and 15 – insulators; I, II, III – areas of discharge chambers

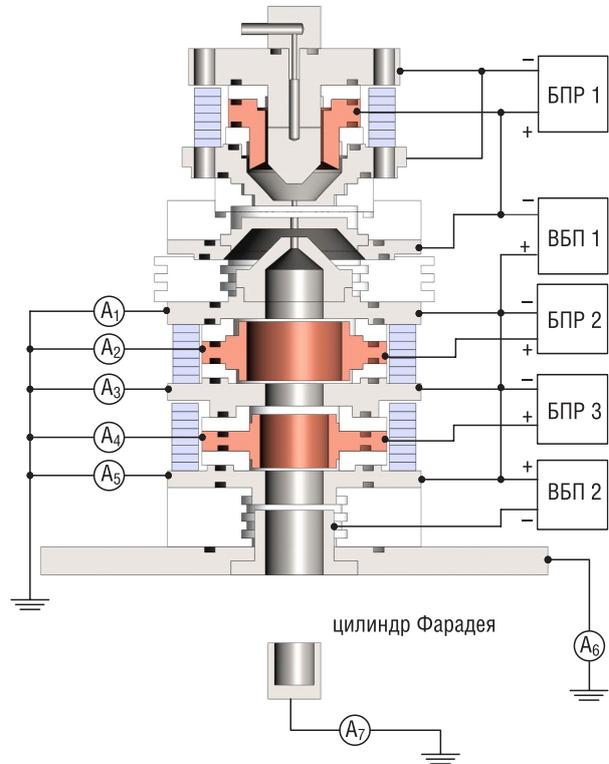


Рис. 2. Схема подключения электродов разрядных камер электронно-ионного источника на основе разряда в скрещенных $E \times H$ полях: БПР – блок питания разряда соответствующей разрядной (I, II или III) камеры с напряжением разряда U_p до 1 кВ и током I_p до 1,2 А; ВБП – высоковольтный блок питания с ускоряющим напряжением U_a до 5 кВ и током до 0,5 А; ВБП 1 – блок ускорения электронов; ВБП 2 – блок ускорения ионов; A_1 – A_7 – амперметры

Fig. 2. Diagram of the connection of the electrodes of the discharge chambers of the electron-ion source based on discharge in crossed $E \times H$ fields: БПР – power supply unit of the corresponding discharge (I, II, or III) camera with discharge voltage U_d up to 1 kV and current I_d up to 1.2 A; ВБП – high-voltage power supply unit with accelerating voltage U_{ac} up to 5 kV and current up to 0.5 A; ВБП 1 – electron acceleration unit; ВБП 2 – ion acceleration unit; A_1 – A_7 – ammeters

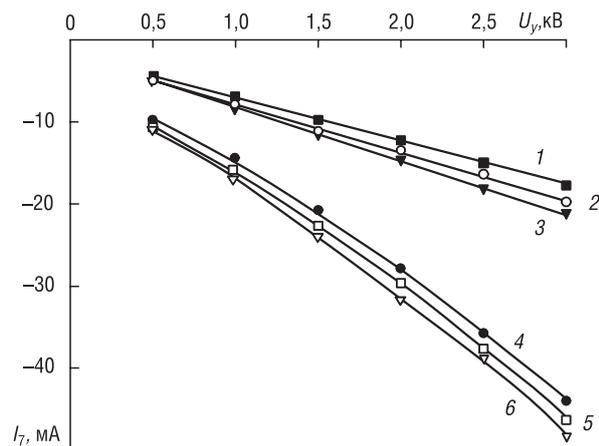


Рис. 3. Ток I_7 (в цилиндр Фарадея) при отсутствии (1–3) и наличии (4–6) инициации разряда в разрядной камере II для различных напусков газа Q : I_p в камере I (см. рис. 1) 200 мА, напряжение горения разряда 420 В; I_p в камере II (см. рис. 1) 180 мА, напряжение горения разряда 410 В. Напуск газа Q : 1, 4 – 1,1 мПа·м³/с; 2, 5 – 2,2 мПа·м³/с; 3, 6 – 3,5 мПа·м³/с

Fig. 3. Current I_7 (into the Faraday cylinder) in the absence of (1–3) and the presence of (4–6) initiation discharge in discharge chamber II: I_d in chamber I (see Fig. 1) is 200 mA, the discharge voltage of the discharge is 420 V; I_d in chamber II (see Fig. 1) is 180 mA, and the discharge voltage of the discharge is 410 V. Gas inlet Q : 1, 4 – 1.1 mPa·m³/s; 2, 5 – 2.2 mPa·m³/s; 3, 6 – 3.5 mPa·m³/s

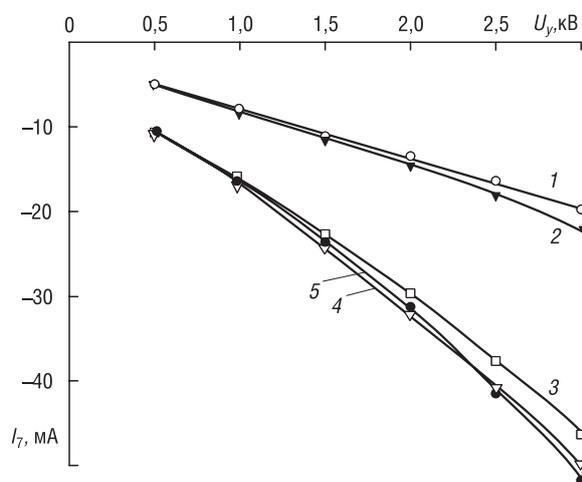


Рис. 4. Ток I_7 (в цилиндр Фарадея) при отсутствии (1, 2) и наличии (3–5) инициации разряда в разрядной камере II для различных токов разряда: I_p в камере I (см. рис. 1): 1, 3, 5 – 200 мА, напряжение горения разряда 420 В; 2, 4 – 240 мА, напряжение горения разряда 450 В; I_p в камере II (см. рис. 1): 3, 4 – 180 мА, напряжение горения разряда 410 В; 5 – 210 мА, напряжение горения разряда 430 В. Напуск газа Q – 1,1 мПа·м³/с

Fig. 4. Current I_7 (to the Faraday cup) in the absence of (1, 2) and the presence of (3–5) discharge initiation in the discharge chamber II for various discharge currents: I_d in the chamber I (see Fig. 1) 1, 3, 5 – 200 mA, discharge burning voltage 420 V; 2, 4 – 240 mA, discharge voltage 450 V; I_d in the chamber II (see Fig. 1): 3, 4 – 180 mA, discharge burning voltage 410 V; 5 – 210 mA, discharge burning voltage of 430 V. Gas inlet Q – 1.1 mPa·m³/s

формировать различные режимы работы всего источника в целом. Проведенные испытания показали перспективность следующих режимов работы: при иницировании разряда в двух разрядных камерах (см. рис. 1, камеры I и II) в режиме извлечения электронов и при одновременном формировании пучка электронов и ионов.

Так, иницирование разряда в двух разрядных камерах (см. рис. 1, камеры I и II) в режиме извлечения электронов свидетельствует о перспективности применения подобных структур в качестве прототипов высокоперевансных плазменных источников электронов. Предполагается следующий механизм работы в таком режиме: электронный пучок, формируемый в камере I и попадающий после ускорения в структуру, образованную электродами камеры II, распространяется вдоль оси в этой структуре и иницирует разряд низкого давления, в результате чего формируется плазма, эмитирующая ионы. Ионы распространяются в верхнюю структуру, повышают ионизацию газа в области отбора электронов и плотность эмиссионного тока и частично компенсируют объемный заряд ускоряющего промежутка, что приводит к увеличению первеанса источника. Об этом свидетельствует изменение наклона вольтамперных характеристик извлечения при наличии (рис. 3, кривые 4–6; рис. 4, кривые 3–5) инициации разряда в разрядной камере II (см. рис. 1) макета источника в сравнении с его отсутствием (рис. 3, кривые 1–3; рис. 4, кривые 1, 2). Вид характеристик свидетельствует о слабом влиянии на первеанс источника величины тока разряда и напуска газа (давления в разрядной камере) в рабочем диапазоне устойчивого существования разряда. Из представленных характеристик видно, что определяющее действие на первеанс источника оказывает наличие дополнительного разряда в камере II (см. рис. 1).

На рис. 5 представлены вольтамперные характеристики извлечения при одновременном формировании пучка электронов и ионов для двух режимов. В первом режиме (рис. 5, кривая 1) фиксировалось напряжение блока ускорения ионов (см. рис. 2, ВВП 2) на уровне 1,5 кВ и варьировалось напряжение блока ускорения электронов (см. рис. 2, ВВП 1). Во втором режиме (рис. 5, кривая 2) фиксировалось напряжение ускорения электронов на уровне 1,5 кВ, а варьировалось напряжение ускорения ионов.

В случае фиксированного напряжения ускорения ионов на участке I (рис. 5, кривая 1) реализуется практически полная компенсация электронного пучка в диапазоне от 0 до 1,5 кВ, и ток в цилиндр Фарадея близок к нулевому значению. При превышении ускоряющего электроны напряжения 1,5 кВ ток в цилиндр Фарадея повышается, однако он (рис. 5, область II на кривой 1) ниже значения тока эмиссии при инициации разряда в разрядных камерах I и II (см. рис. 3, кривая 2) и подаче ускоряющего электроны напряжения.

При фиксации напряжения ускорения электронов на уровне 1,5 кВ и варьировании напряжения ускорения ионов (рис. 5, область I, кривая 2) ток в цилиндр Фарадея претерпевает скачкообразное изменение полярности в области напряжения ускорения ионов 1,5 кВ, что свидетельствует о взаимной компенсации электронного и ионного пучков до этого значения и преобладающей эмиссии из источника ионов при напряжениях выше фиксированного напряжения ускорения электронов 1,5 кВ. Значение тока эмиссии ионов при напряжении 3 кВ составляет 45 мА, а плотность тока эмиссии ионов – порядка 10 мА/см², полученные значения указывают на перспективность разработки на базе данной конструкции электронно-ионного источника для промышленной реализации различных технологий обработки и модификации поверхностей материалов.

Необходимо отметить, что на рис. 5 в области I существует область неопределенности полярности тока эмиссии, что обусловлено, по-видимому, наличием в разрядных структурах II и III (см. рис. 1) двойных электрических слоев. При ускоряющих напряжениях более 1,5 кВ в области II (рис. 5) поле двойных электрических слоев оказывает уже слабое влияние на движение зарядов в газоразрядных структурах II и III (см. рис. 1), а токи электронов I_{e7} и ионов I_{i7} (рис. 5) имеют определенные значения. Исследования проводились для достаточно широкого диапазона значений напусков газа 1,1–3,5 мПа·м³/с и токов разряда 0,18–0,24 А. Полученные результаты оказались подобны представленным характеристикам и на рисунках не приводятся. Линейный вид вольтамперных характеристик обеспечивает высокую управляемость технологическими характеристиками источника. Наличие дополнительных разрядных структур и соответствующих систем электропитания усложняет конструкцию источника, однако однозначность влияния напряжения в дополнительных блоках питания на характеристики извлечения источника в целом позволяет создать общую согласованную автоматизированную систему управления. Приведенные характеристики свидетельствуют о возможности разработки технологического источника заряженных частиц для реализации технологий, требующих комбинированного воздействия электронными и ионными пучками.

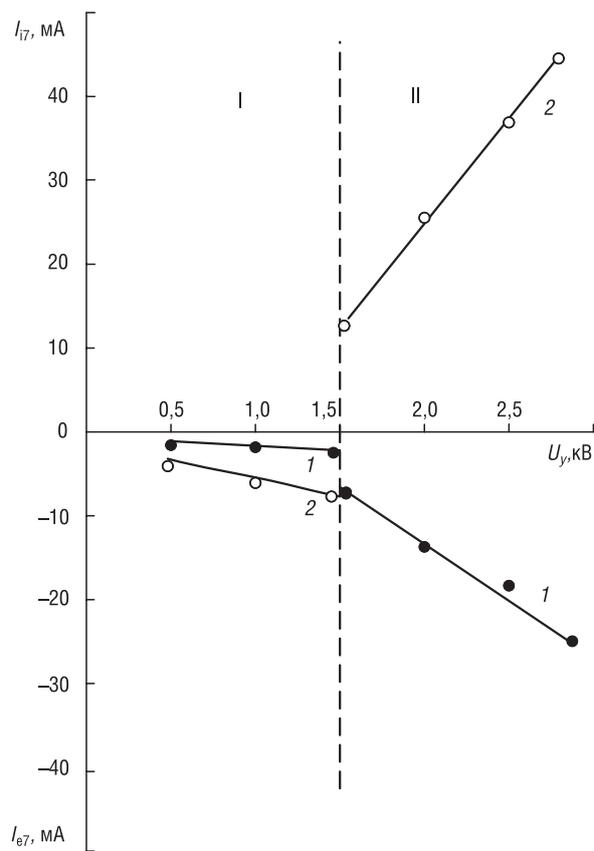


Рис. 5. Ток I_7 (в цилиндр Фарадея): I_{e7} – электронный ток в цилиндр Фарадея; I_{i7} – ионный ток в цилиндр Фарадея; 1 – фиксированное напряжение ускорения ионов 1,5 кВ (см. рис. 2, ВБП 2); 2 – фиксированное напряжение ускорения электронов 1,5 кВ (см. рис. 2, ВБП 1); ток разряда в камере I (см. рис. 1) 200 мА, напряжение горения разряда 420 В; ток разряда в камере II (см. рис. 1) 180 мА, напряжение горения разряда 410 В

Fig. 5. Current I_7 (into the Faraday cylinder): I_{e7} – electron current in the Faraday cylinder; I_{i7} – ionic current in the Faraday cylinder; 1 – fixed ion acceleration voltage of 1.5 kV (see Fig. 2, ВБП 2); 2 – fixed electron acceleration voltage of 1.5 kV (see Fig. 2, ВБП 1); the discharge current in chamber I (see Fig. 1) is 200 mA, and the burning voltage of the discharge is 420 V; the discharge current in chamber II (see Fig. 1) is 180 mA, and the discharge voltage of the discharge is 410 V

Заклучение. Представленная в данной статье конструкция плазменного источника заряженных частиц далеко не исчерпывает весь спектр возможных технологических и конструктивных решений, а только показывает потенциальные возможности такого типа источников для решения актуальных задач формирования технологических электронных и ионных пучков с целью реализации электронно-лучевого ассистирования плазмохимическим процессам или комбинированного воздействия электронными и ионными пучками. Предложенная конструкция может служить прототипом технологических источников, формирующих скомпенсированные ионные пучки, пучки нейтральных атомов, или для реализации попеременного либо одновременного воздействия пучками обоих типов заряженных частиц. Такого типа источники могут стать уникальным универсальным инструментом для нанесения пленочных покрытий различного назначения. Подобные системы могут представлять интерес и как отдельные источники, и как ячейки мультитразрядного источника для формирования воздействия на большие площади [8].

Список использованных источников

1. Физика и технология плазменных эмиссионных систем / под общ. ред. В.Т. Барченко. – СПб.: Изд-во С.-Петербург. гос. электротехн. ун-та «ЛЭТИ», 2014. – 286 с.
2. Кузьмичёв, А.И. Магнетронные распылительные системы / А.И. Кузьмичёв. – Киев: Аверс, 2008. – Кн. 1: Введение в физику и технику магнетронного распыления. – 244 с.
3. Окс, Е.М. Источники электронов с плазменным катодом: физика, техника, применения / Е.М. Окс. – Томск: Изд-во науч.-техн. лит., 2005. – 216 с.
4. Universal plasma electron source / V. A. Gruzdev [et al.] // *Vacuum*. – 2005. – Vol. 77, iss. 4. – P. 399–405. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2004.05.007>
5. Крейндел, Ю.Е. Плазменные источники электронов / Ю.Е. Крейндел. – М.: Атомиздат, 1977. – 144 с.
6. Ремпе, Н.Г. Промышленное применение электронных пушек с плазменным катодом / Н.Г. Ремпе // *Плазменная эмиссионная электроника: тр. II Междунар. Крейнделевского семинара, г. Улан-Удэ, 17–24 июня 2006 г.* – Улан-Удэ: Изд-во Бурят. науч. центра СО РАН, 2006. – С. 108–112.
7. Plasma emission systems for electron and ion-beams technologies / D. A. Antonovich [et al.] // *High Temperature Material Processes: An International Quarterly of High-Technology Plasma Processes*. – 2017. – Vol. 21, iss. 2. – P. 143–159. <https://doi.org/10.1615/HighTempMatProc.2017024672>
8. Бугаев, С.П. Электронные пучки большого сечения / С.П. Бугаев, Ю.Е. Крейндел, П.М. Щанин. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 112 с.

References

1. Barchenko V. T., ed. *Physics and Technology of Plasma Emission Systems*. St.-Petersburg, Publ. House of SPbGETU “LETI”, 2014. 286 p. (in Russian).
2. Kuzmichyov A. I. *Magnetron Sputtering Systems. Book 1. Introduction to the Physics and Technology of Magnetron Sputtering*. Kiev, Avers Publ., 2008. 244 p. (in Russian).
3. Oks E. M. *Sources of Electrons with a Plasma Cathode*. Tomsk, Scientific and Technical Literature Publ. House, 2005. 216 p. (in Russian).
4. Gruzdev V. A., Zaleski V. G., Antonovich D. A., Golubev Y. P. Universal plasma electron source. *Vacuum*, 2005, vol. 77, iss. 4, pp. 399–405. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2004.05.007>
5. Kreindel’ Yu. E. *Plasma Electron Sources*. Moscow, Atomizdat Publ., 1977. 144 p. (in Russian).
6. Rempe N. G. Industrial application of electron guns with a plasma cathode. *Plazmennaya emissionnaya elektronika: trudy II Mezhdunarodnogo Kreindelevskogo seminar, g. Ulan-Ude, 17–24 iyunya 2006 g.* [Plasma Emission Electronics: Proceedings of the International Kreindel Seminar, Ulan-Ude, June 17–24, 2006]. Ulan-Ude, Publ. House of the Buryat Scientific Center of the SB RAS, 2006, pp. 108–112 (in Russian).
7. Plasma emission systems for electron and ion-beams technologies / D. A. Antonovich [et al.] // *High Temperature Material Processes: An International Quarterly of High-Technology Plasma Processes*. – 2017. – Vol. 21, iss. 2. – P. 143–159. <https://doi.org/10.1615/HighTempMatProc.2017024672>
8. Bugaev S. P., Kreindel’ Yu. E., Shchanin P. M. *Large-Section Electron Beams*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984. 112 p. (in Russian).

Информация об авторах

Антонович Дмитрий Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой энергетики и электроники, Полочский государственный университет (ул. Блохина, 30, 211440, Новополоцк, Витебская обл., Республика Беларусь). E-mail: d.antonovich@psu.by

Information about the authors

Dmitry A. Antonovich – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Energy and Electronics, Polotsk State University (30, Blokhin Str., 211440, Novopolotsk, Vitebsk Region, Republic of Belarus). E-mail: d.antonovich@psu.by

Груздев Владимир Алексеевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры физики, Полоцкий государственный университет (ул. Блохина, 30, 211440, Новополоцк, Витебская обл., Республика Беларусь). E-mail: v.gruzdev@psu.by

Залесский Виталий Геннадьевич – доктор физико-математических наук, доцент, директор Физико-технического института Национальной академии наук Беларуси (ул. Академика Купревича, 10, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: V.Zalesski@mail.ru

Солдатенко Павел Николаевич – старший преподаватель кафедры физики, Полоцкий государственный университет (ул. Блохина, 30, 211440, Новополоцк, Витебская обл., Республика Беларусь). E-mail: p.soldatenko@psu.by

Vladimir A. Gruzdev – D. Sc. (Engineering), Professor, Professor of the Department of Physics, Polotsk State University (30, Blokhin Str., 211440, Novopolotsk, Vitebsk Region, Republic of Belarus). E-mail: v.gruzdev@psu.by

Vitali G. Zalesski – D. Sc. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Director of the Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (10, Academician Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: V.Zalesski@mail.ru

Pavel N. Soldatenko – Senior Lecturer, Department of Physics, Polotsk State University (30, Blokhin Str., 211440, Novopolotsk, Vitebsk Region, Republic of Belarus). E-mail: p.soldatenko@psu.by