УДК 537.533; 621.384 DOI 10.63874/2218-0303-2025-1-13-21

Дмитрий Анатольевич Антонович[1], Марина Александровна Сковородко[2], Диана Владимировна Шидловская[3]
[1]канд. техн. наук, доц., ведущий науч. сотрудник
отдела электронно-лучевых технологий и физики плазмы
Физико-технического института Национальной академии наук Беларуси
[2]магистр техн. наук, ст. преподаватель каф. физики
Полоцкого государственного университета имени Евфросинии Полоцкой
[3]преподаватель каф. прикладного и системного программирования
Витебского государственного университета имени П. М. Машерова
Dmitry Antonovich[1], Marina Skovorodko[2], Diana Shidlovskaya[3]
[1]Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Leading Researcher of the Department of Electron Beam Technologies and Plasma Physics
of the Physical-Technical Institute of National Academy of Sciences of Belarus
[2]Master of Technical Sciences, Senior Lecturer of the Department of Physics
of Polotsk State University named after Euphrosyne of Polotsk
[3]Teacher of the Department of Applied and System Programming
of Vitebsk State University named after P. M. Masherov
e-mail: [2]volal26@ya.ru; [3]dianabirukovaseal@gmail.com

ПЛАЗМЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧНЫХ ИОННО-ЭЛЕКТРОННЫХ СОВМЕЩЕННЫХ В ПРОСТРАНСТВЕ ПУЧКОВ

Представлены некоторые результаты, полученные в результате исследований разработанных ранее плазменных источников низкоэнергетичных ионно-электронных совмещенных в пространстве пучков, в конструкции которых были внесены изменения, касающиеся формы и геометрических характеристик эмиссионного канала и протяженности ускоряющих промежутков. Показано, что двойная плазменная эмиссионная система, формируемая в подобных конструкциях, представляющих собой две соединенных последовательно (вдоль оси) газоразрядных ячейки «пеннинговского» типа, за счет обратного потока зарядов из вторичной плазмы в эмитирующую и частичной компенсации объемного заряда пучка, способствует увеличению тока эмиссии и обладает повышенным первеансом. Кроме того, в рассматриваемых конструкциях за счет снижения радиального градиента потенциала в ускоряющем промежутке обеспечивается уменьшение расходимости пучка и повышается токопрохождение. Приведены вольт-амперные и эмиссионные характеристики для различных условий и режимов работы источников. Показано, что достигаемые параметры свидетельствуют о возможности использования разработанных конструкций в качестве прототипов технологических источников низкоэнергетичных ионно-электронных совмещенных в пространстве пучков.

Ключевые слова: *электронно-ионные лучевые технологии, плазменные источники электронов, плазменные источники ионов, плазменные эмиссионные системы, электронно-ионные технологии, совмещенные электронно-ионные низкоэнергетичные пучки.*

Plasma Sources of Low-Energy Ion-Electron Space-Combined Beams

The paper presents some results obtained in the studies of previously developed plasma sources of low-energy ion-electron spatially aligned beams, the design of which was modified to include the shape and geometric characteristics of the emission channel and the length of the accelerating gaps. It is shown that a double plasma emission system formed in such designs, which are two Penning-type gas-discharge cells connected in series (along the axis), due to the reverse charge flow from the secondary plasma to the emitting plasma and partial compensation of the beam space charge, contributes to an increase in the emission current and has an increased perveance. In addition, in the designs under consideration, due to a decrease in the radial potential gradient in the accelerating gap, a decrease in the beam divergence is ensured and current flow is increased. Current-voltage and emission characteristics are given for various conditions and operating modes of the sources. It is shown that the achieved parameters indicate the possibility of using the developed designs as prototypes of technological sources of low-energy ion-electron beams combined in space.

Key words: *electron-ion beam technologies, plasma electron sources, plasma ion sources, plasma emission systems, electron-ion technologies, combined electron-ion low-energy beams.*

Введение

В современных электронно-ионных лучевых технологиях модификации поверхностей активно развивается область, связанная с использованием пучков заряженных частиц, которые генерируются пушками на основе плазменных образований, являющихся альтернативой термокатодным источникам [1–3].

Одновременно с этим прогресс в технологиях, требующих одновременного воздействия на материалы как электронными, так и ионными пучками, которые в настоящее время реализуются с помощью отдельных источников, способствует поиску решений для создания источников, способных генерировать совмещенные (комбинированные) электронно-ионные пучки [4; 5] с параметрами, удовлетворяющими требованиям таких технологий.

Как было показано ранее [4; 5], одним из возможных подходов к формированию совмещенных электронно-ионных пучков в источниках на основе плазменных эмиттеров является создание газоразрядной структуры, в которой формируются два последовательно расположенных электрических слоя.

В одном из слоев генерируется поток зарядов (ионов или электронов), в то время как другой электрический слой обеспечивает поток зарядов противоположного знака в том же направлении, оставаясь «прозрачным» для потока зарядов из первого слоя.

Очевидно, что такая система формирования совмещенных пучков заряда более сложна по сравнению с известными плазменными источниками электронов и ионов.

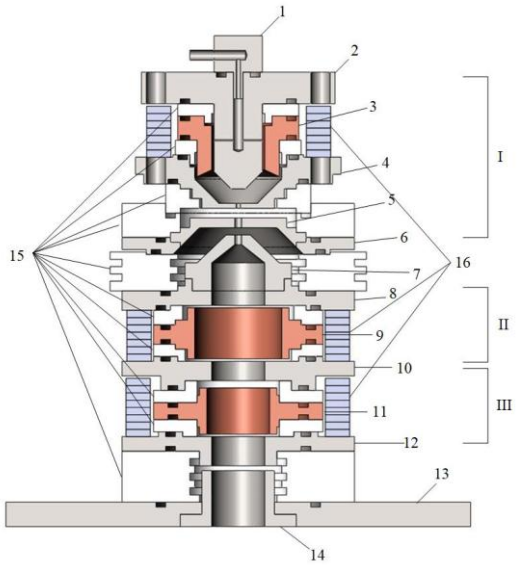
Тем не менее в некоторых случаях она может оказаться наиболее эффективной за счет одновременного воздействия на обрабатываемую поверхность пучками заряженных частиц обоих знаков – термического ассистирующего электронного и модифицирующего ионного.

Полученные ранее первичные результаты позволяют предполагать, что подобные системы обладают повышенным первеансом при формировании электронных пучков благодаря частичной или полной компенсации объемного ионного заряда и увеличению концентрации плазмы в области первичной эмиссии.

В данной работе представлены некоторые результаты, полученные при дальнейшей оптимизации разработанных ранее конструкций плазменных источников низкоэнергетичных ионно-электронных совмещенных в пространстве пучков [4; 5], в которых осуществлены конструктивные изменения в части формы и геометрических характеристик (диаметр, протяженность) эмиссионных отверстий, а также протяженности промежутков ускорения.

Электродная структура плазменных источников низкоэнергетичных ионно-электронных совмещенных в пространстве пучков

Экспериментальные исследования проводились с разработанными макетами плазменных источников низкоэнергетичных ионно-электронных совмещенных в пространстве пучков, представленных в [4], электродные структуры которых приведены на рисунках 1 и 2.

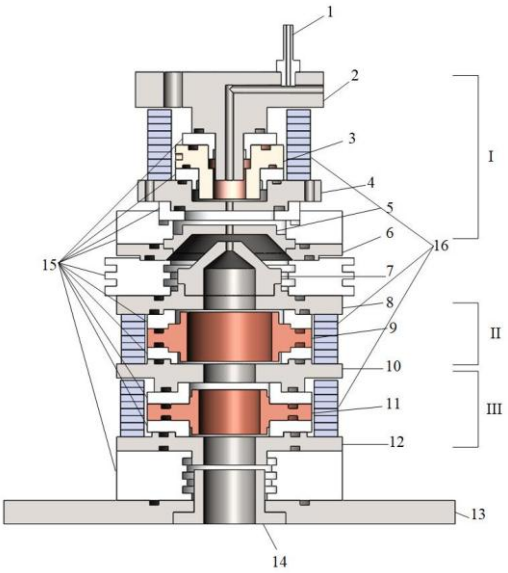


1 – канал для напуска плазмообразующего газа; 2, 4, 8, 10, 12 – катоды; 3, 6, 9, 11 – аноды; 5 – эмиттерный электрод; 7 – экстрактор;– катоды; 13 – фланец; 14 – согласующий электрод; 15 – изоляторы; 16 – постоянные магниты I, II, III – области разрядных камер

Рисунок 1 – Электродная структура плазменного источника низкоэнергетичных ионно-электронных совмещенных в пространстве пучков со скрещенными E × H полями [4]

Экспериментальный вариант макета плазменного источника совмещенных ионных и электронных низкоэнергетичных пучков (рисунок 1) конструктивно состоит из трех блоков. Первый (верхний, область I на рисунке 1) блок, состоящий из катодов 2 и 4, анода 3 и эмиттерного электрода 5, отвечает за генерацию первичной плазмы, эмитирующей электроны. К этому же блоку относится промежуток ускорения электронов – электроды 6 и 7, где происходит извлечение и формирование электронного пучка. Далее, во втором (среднем, область II на рисунке 1) блоке, состоящем из катодов 8, 10 и анода 9, и третьем (нижнем, область III на рисунке 1) – катоды 10, 12 и анод 11 создается эмитирующая ионы, поверхность. При этом данные блоки соответствуют характеристикам устройства, называемого «ячейкой Пеннинга», в котором совмещаются однородное магнитное и неоднородное электрическое поля, определенная комбинация которых позволяет удерживать заряженные частицы в пространственной области вдоль оси газоразрядной структуры. В нижней части макета расположены электроды 12 и 14, которые могут одновременно как ускорять ионы, так и тормозить электроны.

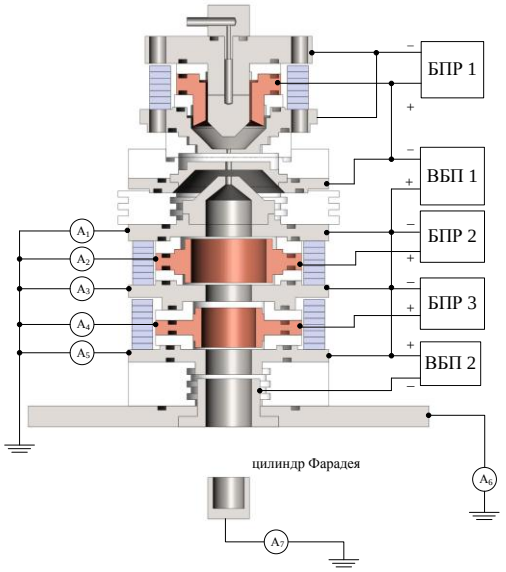
На рисунке 2 приведена электродная структура макета плазменного источника низкоэнергетичных ионно-электронных совмещенных в пространстве пучков с полым катодом. В данной конструкции эмитирующая электроны плазма формируется при подаче разрядного напряжения на электроды разрядной камеры I в области, ограниченной полым катодом 2, катодом 4 и анодом 3. На начальной стадии плазма формируется в области между плоскими частями катодов 2 и 4. Дальнейшее увеличение разрядного напряжения приводит к увеличению тока разряда и концентрации плазмы. При некотором значении тока разряда и концентрации плазмы она проникает в полость катода 2 и стимулирует в ней ионизационные процессы. В этот момент разряд переходит в рабочий режим формирования эмитирующей плазмы – разряд с полым катодом – и концентрация плазмы скачком достигает значений порядка $10^{11} – 10^{12}$ м$^{-3}$. Дальнейший механизм работы аналогичен предыдущей структуре.



1 – канал для напуска плазмообразующего газа; 2, 4, 8, 10, 12 – катоды; 3, 6, 9, 11 – аноды; 5 – эмиттерный электрод; 7 – экстрактор; 13 – фланец; 14 – согласующий электрод; 15 – изоляторы; 16 – постоянные магниты, I, II, III – области разрядных камер

Рисунок 2 – Электродная структура плазменного источника низкоэнергетичных ионно-электронных совмещенных в пространстве пучков с полым катодом [4]

На рисунке 3 представлена схема подключения электродов разрядных камер разработанного макета источника заряженных частиц со скрещенными E × H полями [6] к системе электропитания. Индивидуальное подключение каждой разрядной камеры единой конструкции позволяет обеспечить работу всего источника в целом в различных режимах: генерация электронного, ионного и электронно-ионного пучков. Подключения для макета источника с полым катодом аналогичны.



БПР – блок питания разряда соответствующей разрядной (I, II или III камеры) с напряжением разряда U_d до 1000 В и током I_d до 1,2 А; ВБП – высоковольтный блок питания с ускоряющим напряжением U_{ac} до 5 кВ и током до 0,5 А; ВБП 1 – блок ускорения электронов; ВБП 2– блок ускорения ионов А1 – А7 – амперметры

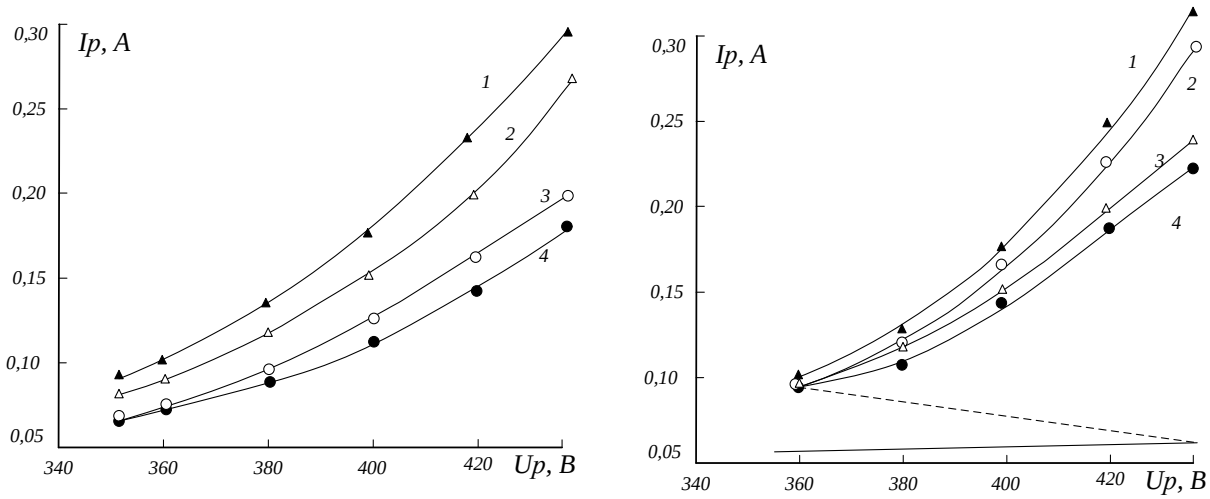
Рисунок 3 – Схема подключения электродов разрядных камер к системе электропитания

Необходимо отметить, что в ходе экспериментов в цилиндр Фарадея (рисунок 3) принимался пучок электронов, ионов или смешанный, электронно-ионный пучок в зависимости от режима работы источника. И в качестве соответствующего тока (электронного или ионного) принимался ток амперметра A_7 (рисунок 3) без учета полярности. На полученных характеристиках, представленных ниже, данный ток обозначен, соответственно, как ток электронного пучка – I_e или ионного I_i.

С представленными макетами плазменных источников низкоэнергетичных ионно-электронных совмещенных в пространстве пучков проводились исследования по извлечению электронов и ионов при инициации разрядов в различных камерах I, II и III.

Эксперименты показали, что вид вольтамперных характеристик является типичным для структур такого типа (рисунок 4) и не зависит от наличия или отсутствия инициации разряда во всех камерах.

Далее приведены полученные результаты для конструкции, представленной на рисунке 1. Для макета плазменного источника низкоэнергетичных ионно-электронных совмещенных в пространстве пучков с полым катодом (рисунок 2) результаты оказались подобными и в тексте статьи не приводятся.

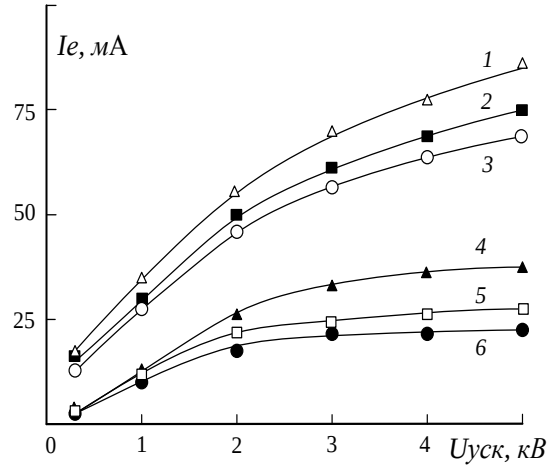


а) б)

Напуск газа Q: 1, 3 – 3,5 мПа·м^3/с; 2, 4 – 2,2 мПа·м^3/с

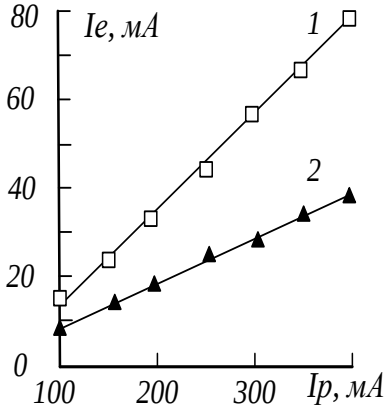
Рисунок 4 – Вольт-амперные характеристики разряда для I (1, 2) и II (3, 4) разрядных камер при одновременном формировании разрядов в указанных камерах для конструкции, представленных на рисунке 1 (а) и рисунке 2 (б)

На рисунке 5а приведены характеристики извлечения электронов с инициацией разряда в нижней камере (II, рисунок 1) и без, а на рисунке 5б приведена эмиссионная характеристика источника при фиксации на уровне 5 кВ напряжения, ускоряющего электроны, и инициацией разряда в нижней камере (II, рисунок 1).



а)

а) эмиссионная характеристика при наличии (1–3) и отсутствии (4–6) инициации разряда в разрядной камере II (электроды 8–10, рисунок 1) для различных напусков газа Q: 1, 4 – 3,5 мПа·м^3/с; 2, 5 – 3 мПа·м^3/с; 3, 6 – 2 мПа·м^3/с; параметры разряда: в камере I (рисунок 1) U_p = 415 В, I_p = 0,2 А; в камере II (рисунок 1) U_p = 420 В, I_p = 0,15 А



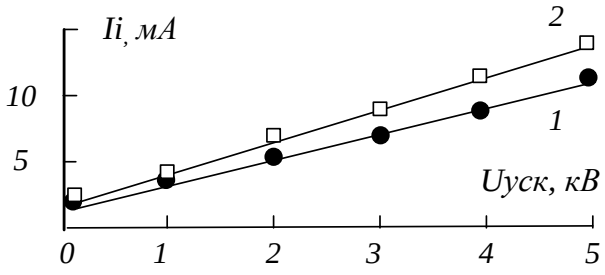
б)

б) вольт-амперная характеристика извлечения при наличии (1) и отсутствии (2) инициации разряда в разрядной камере II (электроды 8–10, рисунок 1), напуск газа Q: 1, 2 – 3,5 мПа·м^3/с; параметры в камере II (рисунок 1) U_p = 420 В, I_p = 0,15 А

Рисунок 5 – Характеристика извлечения электронов в структуре на основе разряда в скрещенных E × H полях

Анализ полученных характеристик подтверждает гипотезу о том, что при инициации разряда в камере II (рисунок 1) поток ионов из плазмы, образовавшейся в этой области, направляется в верхнюю структуру (камера I, рисунок 1). Это способствует частичной компенсации электронного объемного заряда в ускоряющем промежутке, увеличению ионизации газа в области отбора электронов и, как следствие, повышению плотности эмиссионного тока. В результате наблюдается общее увеличение первеанса источника (рисунок 5а, кривые 1–3 и рисунок 5б, кривая 1).

На рисунке 6 представлена вольт-амперная характеристика извлечения ионов при формировании разряда в камерах II и III. Видно, что такой режим работы данного источника отличается низкой эффективностью и представляется малоперспективным для дальнейшей работы.

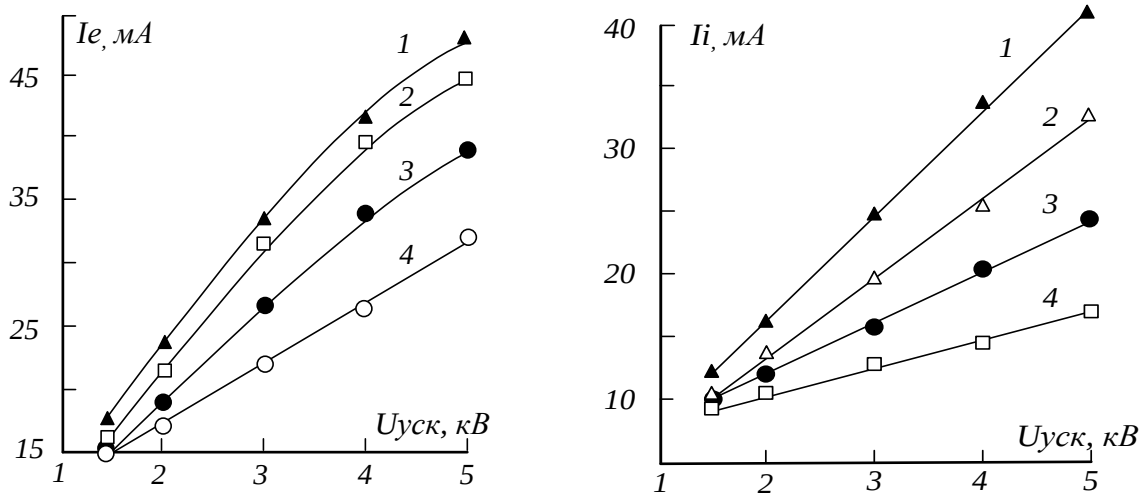


1 – напуск газа Q: 2 мПа·м^3/с; U_p = 420 В, I_p = 0,15 А; 2 – напуск газа Q: 3,5 мПа·м^3/с; U_p = 450 В, I_p = 0,2 А

Рисунок 6 – Характеристики извлечения ионов при наличии разрядов во II и III камерах (рисунок 1)

При формировании электронно-ионного пучка низковольтный разряд зажигался во всех трех камерах (I, II и III – рисунок 1). Электронный пучок, извлекаемый из разрядной камеры I (рисунок 1), ускоряется между электродами 5 и 7 (рисунок 1) и движется вдоль оси конструкции, попадая в разрядные камеры II и III (рисунок 1), что способствует увеличению плотности плазмы, эмитирующей ионы, в этих камерах. Ускоряющее для ионов напряжение прикладывается между электродами 12 и 14 (рисунок 1), в результате чего на выходе источника формируется ионно-электронный пучок. Как указано в [5], влияние полей двойных электрических слоев, образующихся в данной структуре, значительно уменьшается при ускоряющих напряжениях свыше 1,5 кВ, а токи электронной и ионной компонент в электронно-ионном пучке в этом случае имеют определенные значения. На рисунке 7 представлены вольт-амперные характеристики извлечения для электронов (рисунок 7а) и ионов (рисунок 7б) при ускоряющих напряжениях в диапазоне свыше 1,5 кВ. Эмиссионная характеристика, показанная на рисунке 7а, была получена при напряжении ускорения ионов 1,5 кВ и ускоряющем электроны напряжением в диапазоне 1,5–5 кВ. Аналогично, эмиссионная характеристика на рисунке 7б, была получена при фиксированном напряжении ускорения электронов 1,5 кВ и ускоряющем ионы напряжением в диапазоне 1,5–5 кВ.

На рисунке 8 показан внешний вид электронного (а) и ионного (б) пучков.



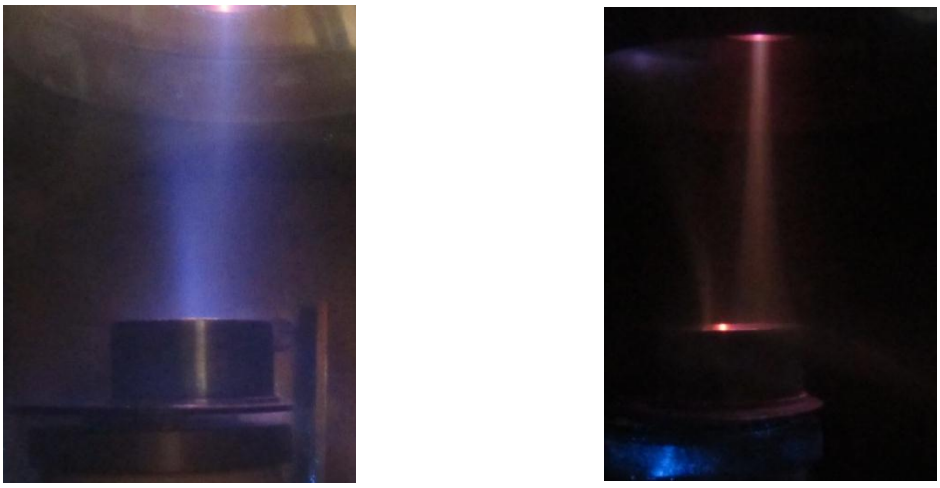
а)

а) напуск газа Q: 1, 2 – 3,5 мПа·м³/с; 3, 4 – 2 мПа·м³/с; параметры разряда: в камере I (рисунок 1) 1, 2 – U_p = 415 В, I_p = 0,2 А; 3, 4 – U_p = 400 В, I_p = 0,15 А; в камере II (рисунок 1) U_p = 425 В, I_p = 0,15 А;

б)

б) напуск газа Q: 1, 2 – 3,5 мПа·м³/с; 3, 4 – 2 мПа·м³/с; параметры разряда: в камере II (рисунок 1) 1, 2 – U_p = 450 В, I_p = 0,2 А; 3, 4 – U_p = 425 В, I_p = 0,15 А; в камере I (рисунок 1) U_p = 415 В, I_p = 0,2 А;

Рисунок 7 – Электронная (а) и ионная (б) характеристики извлечения при генерации совмещенного электронно-ионного пучка



а) б)

Рисунок 8 – Электронный (а) и ионный (б) пучки (ускоряющее напряжение $U_{уск}$ = 5 кВ; I_e = 45мА; I_i = 40мА)

Анализ экспериментальных данных и их сравнение с результатами расчетов позволил оценить эмиссионную способность в ионном режиме. Существуют основания предполагать, что при эмиссии электронов положение эмитирующей плазменной поверхности в конструкции подчиняется закону «степени 3/2» в плоской геометрии и задается равенством плотности тока эмиссии и тепловой плотности электронного тока в плазме [2, 7]:

$$\frac{1}{4}en\sqrt{\frac{8kT_e}{\pi m_e}} = \frac{4\sqrt{2}}{9}\varepsilon_0\sqrt{\frac{e}{m_e}}\frac{U^{3}/_{2}}{l_{сл}^2}$$

где n – концентрация плазмы; $l_{сл}$ – протяженность ускоряющего промежутка; T_e – электронная температура; U – ускоряющее напряжение (потенциал ускоряющего электрода относительно плазмы); m_e, e – масса и заряд электрона; ε_0, k – постоянные.

Для рассматриваемых разрядов электронная температура, как правило, составляет 5–6 эВ [8], тогда при параметрах, соответствующих экспериментам (ускоряющее напряжение 5 кВ, протяженность промежутка ускорения 5 мм), выражение (1) позволяет оценить концентрацию плазмы, которая составляет $(2 - 3) \times 10^{16}$ м$^{-3}$. Поскольку плотность ионного тока соответствует бомовской плотности тока, то при заданных параметрах плотность ионного тока эмиссии составит 15–20 А/м^2, что достаточно для реализации широкого спектра технологий модификации поверхностей [9].

Заключение

Представленные в данной работе конструкции и их характеристики подтверждают возможность создания низкоэнергетичных совмещенных электронно-ионных пучков, а также демонстрируют перспективы их применения для решения актуальных задач, связанных с электронно-лучевым ассистированием плазмохимических процессов или комбинированным воздействием электронно-ионными потоками. Рассмотренные конструкции могут служить прототипами технологических источников, формирующих скомпенсированные ионные пучки, пучки нейтральных атомов, а также для реализации попеременного (комбинированного) или одновременного воздействия пучками обоих типов заряженных частиц.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Физика и технология плазменных эмиссионных систем / под общ. ред. В. Т. Барченко. – СПб. : Изд-во Санкт-Петерб. гос. электротехн. ун-та «ЛЭТИ», 2014. – 286 с.

2. Источники электронов с плазменным эмиттером / Ю. Е. Крейндель [и др.]. – Новосибирск : Наука, 1983. – 120 с.

3. Плазменные процессы в технологических электронных пушках / М. А. Завьялов [и др.] – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 212 с.

4. Плазменный источник заряженных частиц для формирования совмещенных ионно-электронных пучков / Д. А. Антонович [и др.] // Известия НАН Беларуси. Серия физико-технических наук. – 2020. – Т. 65, № 3. – С. 285–291.

5. Antonovich, D. A. Features of Electron Optical Systems with the Plasma Emitter Based on Stationary Double Electric Layers in the Plasma / D. A. Antonovich, V. A. Gruzdev, V. G. Zalesski // Russian Physics Journal. – 2021. – Vol. 63, nr 10. – P. 1713–1720.

6. Залесский, В. Г. Эмиссионные и электронно-оптические системы плазменных источников электронов : дис. … д-ра физ.-мат. наук : 01.04.04 / Залесский Виталий Геннадьевич. – Минск, 2015. – 316 л.

7. Лоусон, Дж. Физика пучков заряженных частиц / Дж. Лоусон ; пер. с англ. А. В. Агафонова. – М. : Мир, 1980. – 438 с.

8. Райзер, Ю. П. Основы современной физики газоразрядных процессов / Ю. П. Райзер. – М. : Наука, 1980. – 416 с.

9. Ионно-плазменные технологии в электронном производстве : монография / В. Т. Барченко, Ю. А. Быстров, Е. А. Колгин ; под ред. Ю. А. Быстрова. – СПб. : Энергоатомиздат, 2001. – 331 с.

REFERENCES

1. Fizika i tiekhnologija plazmiennykh emissionnykh sistiem / pod obshch. ried. V. T. Barchienko. – SPb. : Izd-vo Sankt-Pietierb. gos. eliektrotiekhn. un-ta «LETI», 2014. – 286 s.

2. Istochniki eliektronov s plazmiennym emittierom / Ju. Je. Krejndel’ [i dr.]. – Novosibirsk : Nauka, 1983. – 120 s.

3. Plazmiennyje prociessy v tiekhnologichieskikh eliektronnykh pushkakh / M. A. Zavjalov [i dr.] – M. : Energoatomizdat, 1989. – 212 s.

4. Plazmiennyj istochnik zariazhennykh chastic dlia formirovanija sovmieshchionnykh ionno-eliektronnykh puchkov / D. A. Antonovich [i dr.] // Izviestija NAN Bielarusi. Sierija fiziko-tiekhnichieskikh nauk. – 2020. – T. 65, № 3. – S. 285–291.

5. Antonovich, D. A. Features of Electron Optical Systems with the Plasma Emitter Based on Stationary Double Electric Layers in the Plasma / D. A. Antonovich, V. A. Gruzdev, V. G. Zalesski // Russian Physics Journal. – 2021. – Vol. 63, nr 10. – P. 1713–1720.

6. Zaliesskij, V. G. Emissionnyje i eliektronno-optichieskije sistiemy plazmiennykh istochnikov eliektronov : dis. … d-ra fiz.-mat. nauk : 01.04.04 / Zaliesskij Vitalij Giennad’jevich. – Minsk, 2015. – 316 l.

7. Louson, Dzh. Fizika puchkov zariazhennykh chastic / Dzh. Louson ; pier. s angl. A. V. Agafonova. – M. : Mir, 1980. – 438 s.

8. Rajzer, Ju. P. Osnovy sovriemiennoj fiziki gazorazriadnykh processov / Ju. P. Rajzier. – M. : Nauka, 1980. – 416 s.

9. Ionno-plazmiennyje tiekhnologii v eliektronnom proizvodstvie : monografija / V. T. Barchienko, Ju. A. Bystrov, Je. A. Kolgin ; pod ried. Ju. A. Bystrova. – SPb. : Energoatomizdat, 2001. – 331 s.

Рукапіс паступіў у рэдакцыю 04.05.2025