

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский университет «МЭИ»

ТРЕТЬЯ
МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ СВАРКА
И СМЕЖНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

Материалы конференции

Научное электронное издание

Москва 2020

ББК 30.61
УДК 621.7
Э455

Издается по решению оргкомитета
конференции

Подготовлено на кафедре технологии
металлов

Научное электронное издание

Под редакцией В. К. Драгунова – доктора технических наук, проректора по научной работе
«НИУ «МЭИ», зав. кафедрой технологии металлов, председателя оргкомитета конференции.

Ответственные за верстку и оформление: Р.В. Родякина, М. В. Чепурин, Тереньтев Е. В.

Э455 Третья международная конференция «Электронно-лучевая сварка и смежные технологии»: Материалы конференции /ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» 12-15 ноября 2019 года – М.: Издательство МЭИ, 2020. Свободный доступ <http://ebw2019.mpei.ru/>

ISBN 978-5-7046-2310-6

Доклады посвящены актуальным проблемам электронно-лучевой сварки и смежных технологий. Материалы сборника разделены на пять разделов. Первый раздел посвящен физическим процессам при обработке материалов концентрированными потоками энергии. Во втором разделе рассмотрены технологии сварки, термообработки и модифицирования с использованием электронного луча. В третьем разделе приведены работы по различным видам аддитивных технологий, рассмотрены основные проблемы получения качественных изделий. В четвертом разделе представлены материалы по разработке оборудования для электронно-лучевой сварки: электронно-лучевые комплексы и энергоблоки, электронно-лучевые пушки, приборы управления, устройства слежения. Пятый раздел посвящен вопросам сварочного материаловедения, контролю, диагностике и определению механических характеристик сварных швов. Материалы конференции будут интересны специалистам в области обработки материалов электронным лучом и КПЭ, материаловедцам, технологам и конструкторам авиационного, космического, энергетического и судового машиностроения, а также студентам и аспирантам, специализирующимся в области сварочных технологий.

ISBN 978-5-7046-2310-6

© Национальный исследовательский
университет «МЭИ», 2020

Опыт формирования совмещенных низкоэнергетичных электронно-ионных пучков в плазменных источниках заряженных частиц

Д.А. Антонович, В.А. Груздев

Полоцкий государственный университет, Блохина, 29, Новополоцк, 211440, Беларусь

E-mail: d.antonovich@psu.by

Аннотация. В работе показана возможность формирования совмещенных электронно-ионных пучков в единой мультиразрядной структуре, не содержащей накаливаемых элементов. Предложена конструкция электродной структуры электронно-ионного источника, состоящая из двух соединенных последовательно (вдоль оси) газоразрядных ячеек «пеннинговского» типа. Показано, что взаимосвязь раздельно управляемых разрядов в структуре способствует повышению степени ионизации газа при пониженном давлении, а также формированию в плазме двойных электрических слоев, обеспечивающих образование в единой структуре совмещенных ионно-электронных потоков. Это обеспечивается за счет создания условий для дрейфа электронного пучка через всю часть электродной структуры, обеспечивающую формирование ионного тока источника, и способствует повышению степени ионизации газа в этой области. Кроме этого, торможение электронного пучка в промежутке ускорения ионов обеспечивает возвращение электронов, потерявших часть своей энергии на ионизацию газа, в область формирования плазмы, эмитирующей ионы. Это способствует повышению плотности эмиссионного тока ионов. Представлены некоторые экспериментальные параметры пучков, формируемых разработанной структурой.

1. Введение

Одним из механизмов повышения эффективности ионно-плазменных технологий является частичная или полная компенсация положительного заряда ионов в потоке или на обрабатываемой поверхности. С этой целью, как правило, используются дополнительные эмитирующие 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 объёмного заряда в пучке. В условиях интенсивных ионных потоков ресурс таких эмиттеров ограничен вследствие интенсивной ионной бомбардировки, а сами накальные эмиттеры отличаются высоким энергопотреблением и низкой эффективностью. Поэтому поиск безнакальных компенсационных эмиттеров электронов остается актуален.

Известно применение в качестве компенсирующих источников разрядных систем с полым катодом [1]. Однако в этих системах

необходимо согласование систем управления параметрами формируемых в независимых источниках ионного и электронного потоков, требуется учитывать взаимное влияние магнитных полей этих источников для обеспечения высокой эффективности технологического процесса.

В тоже время низкоэнергетичные электронные пучки могут применяться для термического воздействия на подложку для интенсификации плазмохимических процессов и повышения скорости диффузионных процессов в подложке при формировании покрытий. Поэтому для ряда технологий может представлять интерес не только воздействие частично или полностью компенсированными ионными пучками, но и попеременное (теплофизического электронного и модифицирующего ионного) воздействие пучками заряженных частиц обоих знаков заряда.

Для реализации такого воздействия перспективным инструментом представляются плазменные источники заряженных частиц [1-4], не имеющие накаливаемых элементов.

Однако, 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 [5-8], что поскольку условия формирования ионных пучков в известных системах магнетронного типа близки, в первую очередь по давлению, к условиям формирования электронных пучков в системах с плазменным эмиттером, то возможно создание комбинированных источников, обеспечивающих формирование как электронных, так и ионных пучков [9].

В данной работе показана возможность формирования совмещенных электронно-ионных пучков в единой мультиразрядной структуре, не содержащей накаливаемых элементов. Предложена конструкция электродной структуры электронно-ионного источника, состоящая из двух соединенных последовательно (вдоль оси) газоразрядных ячеек «пеннинговского» типа. Показано, что взаимосвязь раздельно управляемых разрядов в структуре способствует повышению степени ионизации газа при пониженном давлении, а также формированию в плазме двойных электрических слоев, обеспечивающих образование в единой структуре совмещенных ионно-электронных потоков. Это обеспечивается за счет создания условий для дрейфа электронного пучка через всю часть электродной структуры, обеспечивающую формирование ионного тока источника, и способствует повышению степени ионизации газа в этой области. Кроме этого, торможение электронного пучка в промежутке ускорения ионов обеспечивает возвращение электронов,

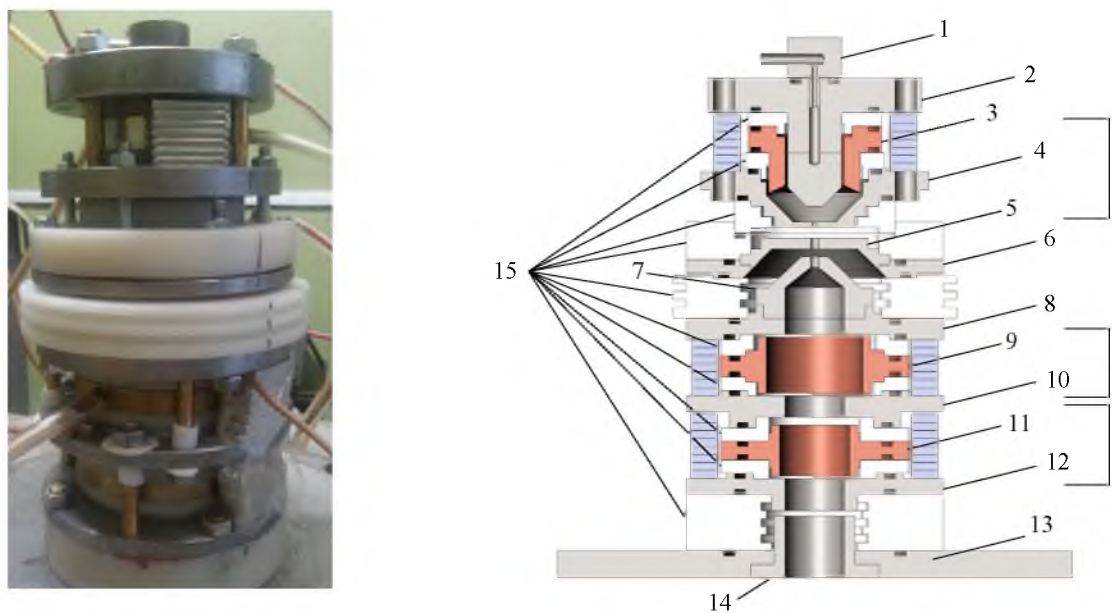
потерявших часть своей энергии на ионизацию газа, в область формирования плазмы, эмитирующей ионы. Это способствует повышению плотности эмиссионного тока ионов. Возможность отдельного регулирования ускоряющих напряжений электронов и ионов в разработанной структуре обеспечивает регулирование в широком диапазоне соотношений энергий электронов и ионов, а также плотностей их токов в электронно-ионном пучке. Это расширяет диапазон возможного технологического применения источника электронно-ионного пучка. Результаты проведенных исследований свидетельствуют о перспективности применения разработанной структуры для конструирования технологических источников совмещенных электронно-ионных пучков.

2. Экспериментальные макеты источников заряженных частиц

Разработанный макет электронно-ионного источника, внешний вид и эскиз электродной структуры которого представлен на рисунке 1, представляет собой генератор эмитирующей плазмы, формируемой в объеме, ограниченном внутренними поверхностями катодов 2 и 4, анода 3 и эмиттерного электрода 5 (разрядная камера I). Электроды 6 и 7 образуют промежуток ускорения электронов, где формируется поверхность плазмы, эмитирующая электроны. Электроды 8-12 образуют газоразрядную структуру, формирующую плазму, являющуюся источником распыляющих ионов. Эта структура состоит из двух соединенных последовательно (вдоль оси) газоразрядных ячеек «пеннинговского» типа (II и III) [10]. Элементы этой структуры 9 и 11 являются анодами разрядных ячеек; элементы 8, 10 и 12 – катодами, которые одновременно являются полюсными наконечниками постоянных магнитов, обеспечивающих осцилляцию электронов между катодами этой (второй) газоразрядной структуры.

Одновременно с этим магнитное поле, формируемое катодами 8, 10 и 12 образует магнитную фокусирующую систему для ускоренного электронного пучка, распространяющегося вдоль оси этой (второй) газоразрядной структуры 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 и определяет распределение плотностей ионного и

электронного тока по поверхности мишени. На рисунке 2 представлена схема подключения блоков питания к электродам макета.



а)

б)

Рисунок 1 – Внешний вид (а) и электродная структура (б) 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

Инициирование разряда в двух разрядных камерах (I и II – рис. 1) 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 I камере (рис. 1) попадающий после ускорения в структуру, образованную электродами камеры II (рис. 1), распространяется вдоль оси в этой структуре и иницирует разряд низкого давления, в котором формируется плазма, эмитирующая ионы.

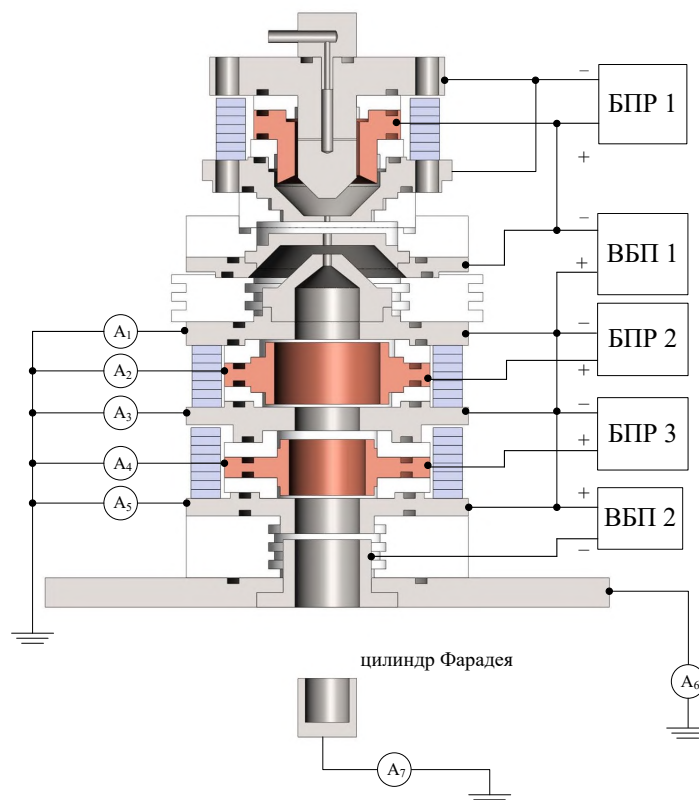


Рисунок 2 – Схема подключения электродов разрядных камер электронно-ионного источника на основе разряда в скрещенных $E \times H$ полях: БПР – блок питания разряда соответствующей разрядной (I, II или III камеры) с напряжением разряда

U_p до 1000 В и током I_p до 1,2 А; ВБП – высоковольтный блок питания с ускоряющим напряжением U_y до 5 кВ и током до 0,5 А; ВБП 1 – блок ускорения электронов; ВБП 2 – блок ускорения ионов

Ионы распространяются в верхнюю структуру, повышая ионизацию газа в области отбора электронов повышая плотность эмиссионного тока и частично компенсируют объемный заряд ускоряющего промежутка, что в целом приводит к увеличению первеанса источника. Об этом свидетельствуют вольтамперные характеристики извлечения при наличии и отсутствии инициации разряда в разрядной камере II (рис. 1) макета источника, приведенные на рисунках 4 и 5. Представленных характеристик свидетельствуют о слабом влиянии на первеанс источника варьирования в рабочем диапазоне напуска газа (давления в разрядной камере) и тока разряда. Из представленных характеристик видно, что определяющее действие на первеанс источника оказывает наличие дополнительного разряда в камере II (рис. 1).

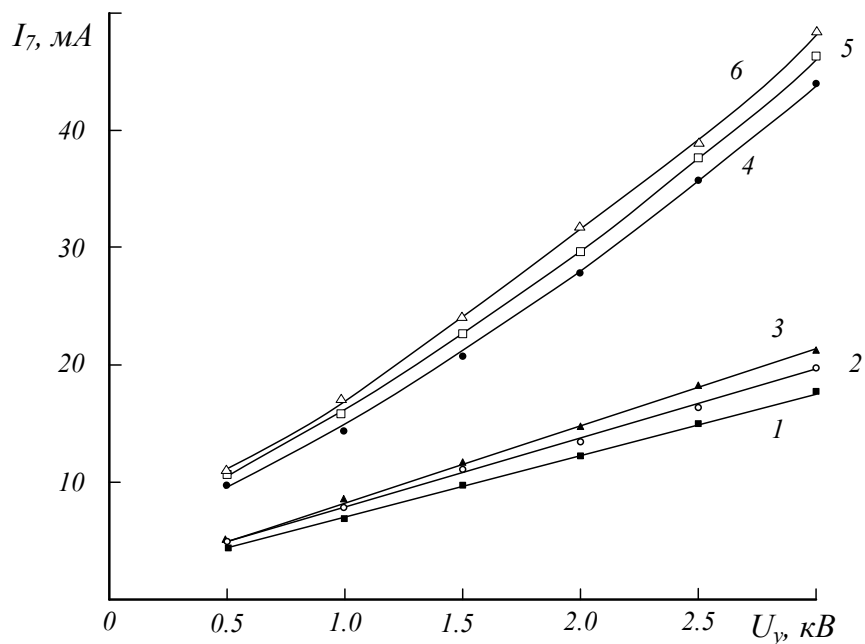


Рисунок 3 – Ток I_7 (в цилиндр Фарадея) при отсутствии (1-3) и наличии (4-6) инициации разряда в разрядной камере II для различных напусков газа Q :
 I_p в камере I (рис. 1) 200 мА, напряжение горения разряда 420 В;
 I_p в камере II (рис. 1) 180 мА, напряжение горения разряда 410 В;
 Напуск газа Q : 1, 4 – $0,05 \cdot 10^{-4}$ л/с; 2, 5 – $0,1 \cdot 10^{-4}$ л/с; 3, 6 – $0,38 \cdot 10^{-4}$ л/с

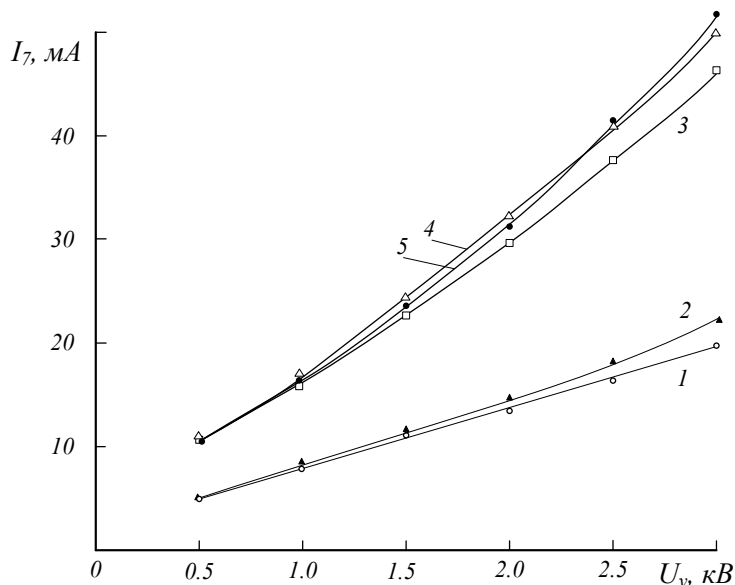


Рисунок 4 – Ток I_7 (в цилиндр Фарадея) при отсутствии (1-2) и наличии (3-5) инициации разряда в разрядной камере II для различных токов разряда в камере I и камере II: 1-5 – напуск газа Q – $0,1 \cdot 10^{-4}$ л/с;
 3, 4 – I_p в камере II (рис. 1) 180 мА, напряжение горения разряда 410 В;
 5 – I_p в камере II (рис. 1) 210 мА, напряжение горения разряда 430 В;
 I_p в камере I (рис. 1): 1, 3, 5 – 200 мА, напряжение горения разряда 420 В;
 2, 4 – 240 мА, напряжение горения разряда 450 В

На рисунке 5 представлены вольтамперные характеристики извлечения при одновременном формировании пучка электронов и ионов

для двух режимов: фиксированное напряжение блока, ускоряющего ионы 1,5 кВ (ВБП 2, рис. 2) и варьирование напряжения блока ускорения электронов (ВБП 1, рис. 2) – рисунок 3 (кривая 1) и второй режим работы, когда фиксировалось напряжение ускорения электронов, а варьировалось напряжение ускорения ионов.

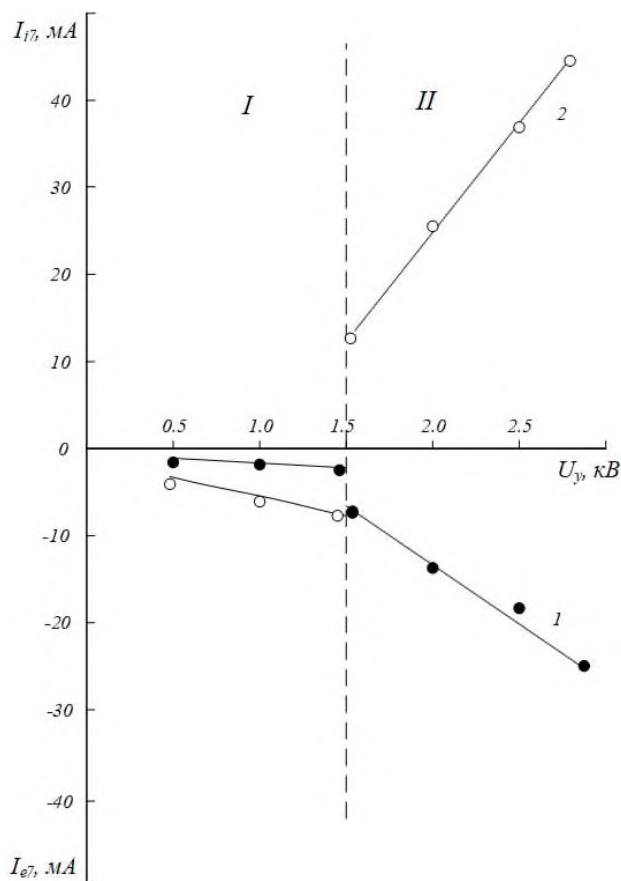


Рисунок 5 – Ток I_7 (в цилиндр Фарадея): I_{e7} – электронный ток в цилиндр Фарадея; I_{i7} – ионный ток в цилиндр Фарадея; 1 – фиксированное напряжение ускорения ионов 1,5 кВ (ВБП 2, рис. 2); 2 – фиксированное напряжение ускорения электронов 1,5 кВ (ВБП 1, рис. 2); ток разряда в камере I (рис. 1) 200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

В случае фиксированного напряжения ускорения ионов на участке I (кривая 1, рис. 5) 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 (фиксированное значение напряжения ускорения ионов) ток в цилиндр Фарадея повышается, однако он (область II на кривой 1, рис. 5) ниже значения тока эмиссии при инициации разряда в разрядных камерах I и II (рис. 3, кривая 2) и подаче ускоряющего электроны напряжения.

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

В области графиков I (рис. 5) существует некоторая неопределенность токов, что обусловлено, по-видимому, наличием в разрядных структурах II и III (рис. 1) двойных электрических слоев. В области графиков II (рис. 5), т.е. при ускоряющих напряжениях более 1,5 кВ, поле двойных электрических слоев оказывает уже слабое влияние на движение зарядов в газоразрядных структурах II и III (рис. 1), а токи электронов I_{e7} и ионов I_{i7} (рис. 5) имеют более определенные значения. Необходимо отметить, что эксперименты проводились для различных напусков газа – в диапазоне $(0,05-0,35) \cdot 10^{-4}$ л/с и токов разряда (0,18-0,24 А), характеристики оказались подобны представленным и на рисунке не приводятся.

Приведенные характеристики в целом свидетельствуют о возможности применения такого макета для разработки технологического источника заряженных частиц для реализации технологий, требующих комбинированного воздействия электронными и ионными пучками, а также служить прототипом ячейки мультиразрядного источника для формирования воздействия на большие площади.

3. Заключение

Представленные конструкции плазменных источников заряженных частиц далеко не исчерпывают весь спектр возможных технологических и конструктивных решений, а только показывают потенциальные возможности такого типа источников для решения актуальных задач формирования технологических электронных и ионных пучков. Такие системы могут формировать скомпенсированные ионные пучки, пучки нейтральных атомов или обеспечивать попеременное или одновременное воздействия пучками обоих типов заряженных частиц, и, значит, представляют уникальный универсальный инструмент для нанесения плёночных покрытий различного назначения [11, 12], что открывает новые перспективы для реализации более эффективных комбинированных способов воздействия.

Литература

1. Gruzdev V A, Zalesski V G, Antonovich D A, Golubev Y P. 2005 *Vacuum* **77**, p. 399-405.
2. Zalesski V G, Antonovich D A. 2007 *Journal of Physics D: Applied Physics* **40**, p.7771-7777.
3. Galansky V L et al. 1994 *Journal of Physics D: Applied Physics* **27**, p. 953-961
4. Bogomolov B K, Gilgenberg V V 2014 *12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, APEIE 2014* **V. 1.** P. 84-87.
5. V Gruzdev V A, Zalesski V G 2010 *Plasma Physics Reports* **36**, p. 1191-1198
6. Zalesski V G, Pobol I L, Gruzdev V A, Antonovich D A, Soldatenko P N 2016 *Herald of Polotsk State University. Series C, Fundamental sciences* **12**, P. 37-44.
7. Antonovich D A, Zalesski V G, Gruzdev V A, Soldatenko P N 2017 *Herald of Polotsk State University. Series C, Fundamental sciences* **4**, P. 45-51.
8. Antonovich D A, Gruzdev V A, Zalesski V G, Pobol I L, Soldatenko P N 2017 *High Temperature Material Processes (An International Quarterly of High-Technology Plasma Processes)* **Vol. 21(2)**, p. 143-159
9. F.M. Penning Coating by Cathode Disintegration. US Patent 2,146,025; N.V. Philips, Gloeilampenfabrieken, Eindhoven, The Netherlands; 1939
10. Bogomolov B K 2016 *11 International forum on strategic technology (IFOST 2016)* P. 178 - 181. - ISBN 978-1-5090-0853-7. - DOI: [10.1109/IFOST.2016.7884077](https://doi.org/10.1109/IFOST.2016.7884077).
11. Bogomolov B K 2010 *10th International conference on actual problems of electronic instrument engineering proceedings. APEIE-2010* **V. 1.** – P. 23-30.