

УДК 537.533

**ЭЛЕКТРОДНАЯ СТРУКТУРА ПЛАЗМЕННОГО ЭЛЕКТРОННО-ИОННОГО ИСТОЧНИКА
ДЛЯ СОВМЕСТНОГО ФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ И ИОННЫХ ПУЧКОВ***канд. техн. наук, доц. Д.А. АНТОНОВИЧ, д-р техн. наук, проф. В.А. ГРУЗДЕВ,**П.Н. СОЛДАТЕНКО**(Полоцкий государственный университет);**д-р физ.-мат. наук, доц. В.Г. ЗАЛЕССКИЙ**(Физико-технический институт НАН Республики Беларусь, Минск)*

Опыт разработки и применения источников электронов и ионов с плазменными эмиттерами позволяет предполагать возможность создания совмещенного ионно-электронного пучка на основе единой плазменной структуры с определенными в ней электростатическими слоями, формирующими в едином объеме ионный и электронный потоки одного направления. В данной работе предложена экспериментальная электродная структура плазменного электронно-ионного источника для совместного формирования электронных и ионных пучков, приведен ряд характеристик, показана перспективность дальнейшей разработки на ее основе электронно-ионного источника для промышленного применения.

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

Введение. В настоящее время источники ионных и электронных пучков позволяют реализовать обширный кластер современных инновационных технологий обработки, модификации и создания новых материалов. В ряде случаев значительное повышение качества таких технологий и производительности технологического оборудования предусматривает одновременное воздействие электронного и ионного пучков. В данный момент такая технология обычно обеспечивается использованием раздельных электронного и ионного источников. При этом наиболее широкое применение для формирования плазменных поверхностей, эмитирующих ионные или электронные пучки, получили газоразрядные электродные структуры, в которых возбуждаются магнетронные разряды [1; 2], или разряды с осцилляцией электронов «пеннинговского» типа (PIG) [3], или с полым катодом [4; 5]. В технологически необходимых условиях низкого давления газа для снижения напряжения разряда и плотности эмитирующей плазмы в газоразрядных структурах используются термокатоды [6]. Существенным недостатком подобных источников является их недолговечность в газовых разрядах.

В названных разрядах эмитирующая плазма отделена от электродов газоразрядной структуры пристеночными электрическими слоями, параметры которых определяются разностью потенциалов между плазмой и каждым электродом, а также плотностью плазмы, как принято в настоящее время, по условию равенства нулю напряженности электрического поля на ее границе [7]. Эмитирующая поверхность плазмы также подчиняется этому условию [8], поэтому электронно- (ионно-) оптические условия в промежутке ускорения электронов (ионов) и формирование пучка зависят от положения и формы эмитирующей границы плазмы, т.е. от ускоряющего напряжения, геометрии электродов и их потенциала. Это создает определенные трудности формирования пучков большого сечения [9].

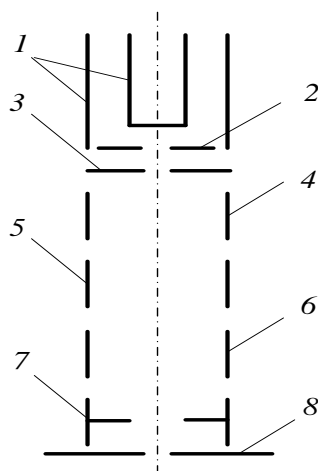
Однако известный эффект возможного формирования вторичной плазмы в ускоряющем промежутке [10] может обеспечить значительное улучшение эмиссионно-оптических свойств источника с плазменным эмиттером: уменьшение расходимости пучка за счет снижения радиального градиента потенциала в ускоряющем промежутке; повышение эмиссионного тока за счет обратного потока зарядов из вторичной плазмы в эмитирующую плазму [11]; повышение первеанса ускоряющей системы за счет частичной компенсации объемного заряда пучка.

Изложенное выше позволяет предполагать:

- 1) возможность создания плазменного объекта с электростатическими слоями в нем, способного обеспечить формирование совмещенных в едином пространстве ионного и электронного пучков;
- 2) многофакторность такой структуры и отсутствие необходимых алгоритмов затрудняет в настоящее время численное моделирование таких структур;
- 3) экспериментальное исследование подобных структур на данном этапе представляется наиболее эффективным для создания технологических источников совмещенных ионно-электронных пучков.

В данной работе предложена концепция и разработанная на ее основе конструкция единой мультиразрядной структуры, способной формировать совмещенные или попеременные ионно-электронные пучки, а также представлены некоторые экспериментальные результаты формирования таких пучков.

Физическая концепция и электродная структура экспериментального источника. Схематически электродная структура экспериментального источника показана на рисунке 1.

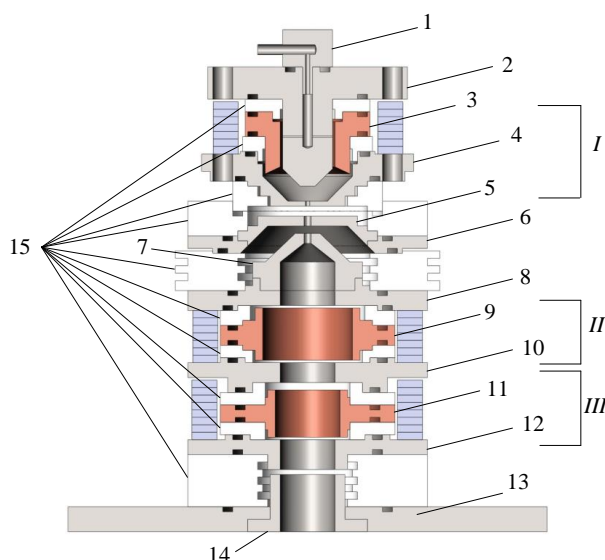


1, 5, 7 – катоды; 2, 4, 6 – аноды; 3 – электрод ускоряющий (электроны); 8 – электрод ускоряющий (ионы)

Рисунок 1. – Схематическая электродная структура разработанного макета электронно-ионного источника со скрещенными $E \times H$ полями

В объеме, ограниченном электродами 1 (катод) и электродом 2 (анод), возбуждается разряд с осциллирующей электронов [12; 13], из плазмы которого электродом 3 обеспечивается эмиссия и ускорение электронов. Электроды 3–7 образуют газоразрядную структуру, формирующую плазму, являющуюся источником распыляющих ионов. Эта структура состоит из двух соединенных последовательно (вдоль оси) газоразрядных ячеек РИГ-типа. Элементы 4 и 6 этой структуры являются анодами разрядных ячеек; элементы 3, 5 и 7 – катодами. Между электродами 7 и 8 прикладывается напряжение, ускоряющее ионы до требуемой технологией энергии распыляющих ионов. В тоже время в этом промежутке (между электродами 7 и 8) осуществляется торможение пучка электронов, ускоренных между электродами 2 и 3.

Реальная конфигурация электродов разработанного макета электронно-ионного источника (эскиз электродной структуры) и блок-схема электропитания показаны на рисунках 2, 3 соответственно.



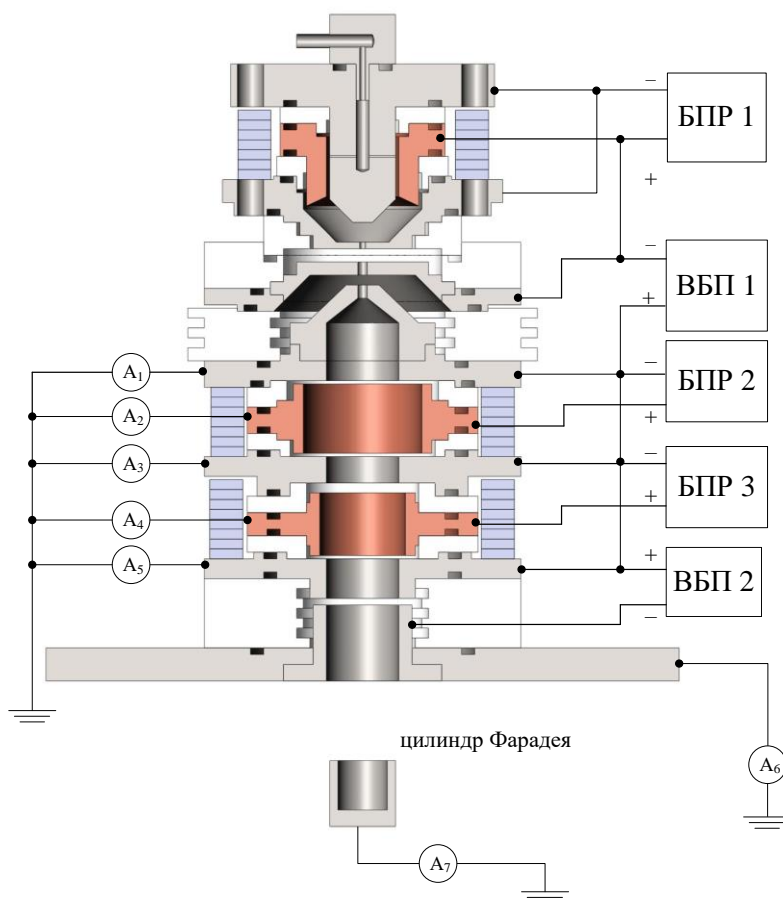
1 – штуцер для напуска плазмообразующего газа; 2 – внутренний катод; 3 – главный анод; 4 – внешний катод; 5 – эмиттерный электрод; 6 – вспомогательный анод; 7 – ускоряющий электрод; 8, 10, 12 – катоды; 9, 11 – аноды; 13 – фланец для установки структуры на рабочую камеру; 14 – согласующий электрод; 15 – изоляторы; I, II, III – области разрядных камер

Рисунок 2. – Электродная структура разработанного макета электронно-ионного источника со скрещенными $E \times H$ полями

Макет 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) [3]. Элементы 9 и 11 этой структуры являются анодами разрядных ячеек; элементы 8, 10 и 12 – катодами, которые одновременно являются полюсными наконечниками постоянных магнитов. Можно предполагать, что в этих ячейках обеспечивается как осцилляция электронов между катодами, так и подобие их циклоидального движения, реализуемого в разрядах магнетронного типа.

Одновременно с этим магнитное поле, формируемое катодами 8, 10 и 12, образует магнитную фокусирующую систему для ускоренного электронного пучка, распространяющегося вдоль оси 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 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 и распределение плотностей ионного и электронного тока по поверхности мишени.

Независимые системы электропитания и ускорения для каждой разрядной камеры единой структуры (рисунок 3) позволяют формировать различные режимы работы всего источника в целом.



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

Рисунок 3. – Схема подключения электродов разрядных камер электронно-ионного источника на основе разряда в скрещенных $E \times H$ полях

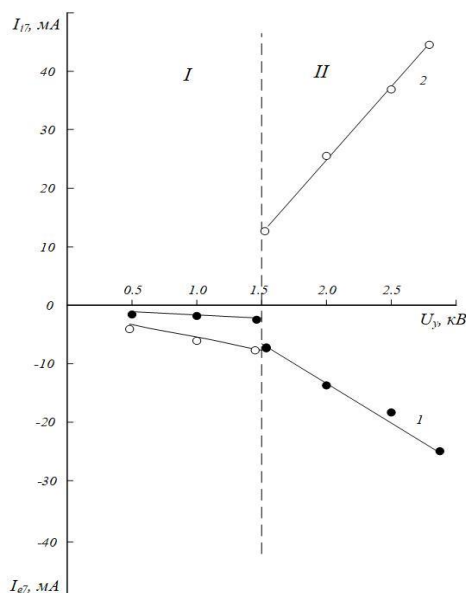
На рисунке 4 представлены вольтамперные характеристики извлечения при одновременном формировании пучка электронов (см. рисунок 2, разрядная камера I) и ионов (см. рисунок 2, разрядные камеры II и III) для двух режимов:

- 1) с фиксированным напряжением 1,5 кВ блока, ускоряющего ионы (см. рисунок 3, ВБП 2), и варьируемым напряжением блока ускорения электронов (см. рисунок 3, ВБП 1);
- 2) с фиксированным напряжением ускорения электронов и варьируемым напряжением ускорения ионов.

В случае фиксированного напряжения ускорения ионов на участке I (рисунок 4, кривая 1) реализуется практически полная компенсация электронного пучка в диапазоне от 0 до 1,5 кВ, ток в цилиндр Фарадея близок к нулевому значению. При превышении ускоряющим электроны напряжением величины +1,5 кВ (фиксированное значение напряжения ускорения ионов –1,5 кВ) ток в цилиндр Фарадея повышается.

При фиксации напряжения ускорения электронов на уровне +1,5 кВ и варьировании напряжения ускорения ионов (рисунок 4, область I, кривая 2), ток в цилиндр Фарадея претерпевает скачкообразное изменение полярности в области напряжения 1,5 кВ (рисунок 4, кривая 2), что свидетельствует о взаимной компенсации электронного и ионного пучков до этого значения и преобладающей эмиссии из источника ионов при напряжениях свыше 1,5 кВ. Значение тока эмиссии ионов при напряжении 3 кВ составляет 45 мА, а плотность тока эмиссии ионов – порядка 10 мА/см², что свидетельствует о перспективности разработки на базе данной конструкции электронно-ионного источника для промышленной реализации различных технологий обработки и модификации поверхностей материалов.

Необходимо отметить, что на рисунке 4 в области I существует область неопределенности полярности тока эмиссии, что обусловлено, по-видимому, наличием в разрядных структурах II и III (см. рисунок 2) двойных электрических слоев. При ускоряющих напряжениях более 1,5 кВ в области II (рисунок 4) поле двойных электрических слоев оказывает уже слабое влияние на движение зарядов в газоразрядных структурах II и III (см. рисунок 2), а токи электронов I_{e7} и ионов I_{i7} (рисунок 4) имеют определенные значения. Важно, что эксперименты проводились в широком диапазоне значений напусков газа 1,1–3,5 мПа·м³/с и токов разряда 0,18–0,24 А. Полученные характеристики оказались подобны уже представленным и на рисунках не приводятся. Линейный вид вольтамперных характеристик обеспечивает высокую управляемость технологическими характеристиками источника. Наличие дополнительных разрядных структур и соответствующих систем электропитания, конечно, 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.



I_{i7} – ионный ток в цилиндр Фарадея;

1 – фиксированное напряжение ускорения ионов 1,5 кВ (см. рисунок 3, ВБП 2);

2 – фиксированное напряжение ускорения электронов 1,5 кВ (см. рисунок 3, ВБП 1);

ток разряда в камере I (см. рисунок 2) 200 мА, напряжение горения разряда 420 В;

ток разряда в камере II (см. рисунок 2) 180 мА, напряжение горения разряда 410 В

Рисунок 4. – Ток I_{i7} (в цилиндр Фарадея): I_{e7} – электронный ток в цилиндр Фарадея

Заключение. Представленная 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 технологически совмещенных электронных и ионных пучков для реализации электронно-лучевого ассистирования плазмохимическим процессам или комбинированного воздействия электронными и ионными пучками. Проведенные испытания показали перспективность разработанной конструкции для реализации режимов формирования электронного пучка с повышенным первеансом и формирования совместных электронно-ионных пучков, однако возможности разработанной структуры не ограничиваются этими режимами работы. Предложенная конструкция может служить прототипом для создания технологических источников для формирования скомпенсированных ионных пучков, пучков нейтральных атомов или для реализации попеременного или одновременного воздействия пучками обоих типов заряженных частиц. Такого типа источники могут стать уникальным универсальным инструментом для нанесения пленочных покрытий различного назначения [11; 12]. Подобные системы могут представлять интерес как в качестве отдельных источников, так и в качестве ячеек мультиразрядного источника для формирования воздействия на большие площади.

ЛИТЕРАТУРА

1. Барченко, В.Т. Физика и технология плазменных эмиссионных систем / В.Т. Барченко. – СПб. : Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. – 286 с.
2. Кузьмичев, А.И. Магнетронные распылительные системы / А.И. Кузьмичев – Киев : Аверс, 2008. – Кн. 1 : Введение в физику и технику магнетронного распыления. – 244 с.
3. Coating by Cathode Disintegration : pat. US 2,146,025 / Penning F.M. ; N.V. Philips, Gloeilampenfabrieken, Eindhoven, The Netherlands. – 1939.
4. Москалев, Б.И. Разряд с полым катодом / Б.И. Москалев. – М. : Энергия, 1969. – 184 с.
5. Крейндел, Ю.Е. Плазменные источники электронов / Ю.Е. Крейндел. – М. : Атомиздат, 1977. – 145 с.
6. Алямовский, И.В. Электронные пучки и электронные пушки / И.В. Алямовский. – М. : Советское Радио, 1966. – 454 с.
7. Груздев, В.А. О механизме возникновения электрического поля в плазме при эмиссии электронов / В.А. Груздев, В.Г. Залесский // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С, Фундаментальные науки. – 2014. – № 4. – С. 103–108.
8. Груздев, В.А. Формирование эмиссионного тока в плазменных эмиттерах электронов. / В.А. Груздев, В.Г. Залесский // Прикладная физика. – 2009. – № 5. – С. 82–90.
9. Gruzdev, V.A. Electron-optical characteristics of the beam generated by the electron plasma sources / V.A. Gruzdev, V.G. Zaleski // Electrotechnica and electronica. – Bulgaria, 2014 – V. 49, № 5–6. – P. 264–268.
10. Gruzdev V.A. Emission current formation in plasma electron emitters / V.A. Gruzdev, V.G. Zaleski // Plasma Physics Reports. – 2010. – № 36. – P. 1191–1198.
11. Залесский, В.Г. Эмиссионные и электронно-оптические системы плазменных источников электронов : дис. ... д-ра физ.-мат. наук : 01.04.04 / В.Г. Залесский. – Минск, 2015. – 316 л.
12. Universal plasma electron source / V.A. Gruzdev [et al.]. // Vacuum. – 2005. – №77. – P. 399–405.
13. Zaleski V.G. Peculiarities of plasma electron sources operation at high pressures / V.G. Zaleski, D.A. Antonovich // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2007. – № 40. – P. 7771–7777.

Поступила 12.03.2020

THE ELECTRODE STRUCTURE OF A PLASMA ELECTRON-ION SOURCE FOR THE SIMULTANEOUS FORMATION OF ELECTRON AND ION BEAMS

D. ANTONOVICH, V. GRUZDEV, P. SOLDATENKO, V. ZALESKI

The experience of developing and using electron and ion sources with plasma emitters suggests the possibility of creating a combined ion-electron beam based on a single plasma structure with certain electrostatic layers in it, forming ion and electron flows in the same direction and in a single volume. In this work, the experimental electrode structure of a plasma electron-ion source for the joint formation of electron and ion beams is proposed, a number of characteristics are given, and the prospects for the further development of an electron-ion source for industrial application on its basis are shown.

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