

УДК 537.533; 621.384

**ВОЗМОЖНОСТЬ ПОВЫШЕНИЯ ПЕРВЕАНСА В ПЛАЗМЕННЫХ ЭМИССИОННЫХ СИСТЕМАХ НА ОСНОВЕ РАЗРЯДА В СКРЕЩЕННЫХ  $E \times H$  ПОЛЯХ**

**С.Н. АБРАМЕНКО, канд. техн. наук, доц. Д.А. АНТОНОВИЧ,  
д-р. техн. наук, проф. В.А. ГРУЗДЕВ, П.Н. СОЛДАТЕНКО  
(Полоцкий государственный университет)**

*Анализ известных конструкций плазменных источников заряженных частиц и основных физических процессов в них показывает, что существует возможность модификации этих структур с целью создания более эффективных условий формирования плазмы и получения тока эмиссии без существенного усложнения конструкции и изменения систем электропитания. В работе представлен макет конструкции плазменного источника заряженных частиц в скрещенных  $E \times H$  полях с повышенным первеансом. Приведена его электродная структура, предложен механизм работы источника, приведены основные характеристики, показана перспективность для дальнейшей разработки на его основе высокопервеансного источника для промышленного применения*

**Ключевые слова:** *первеанс, плазменные эмиссионные системы, плазменный эмиттер, импульсы тока пучка, разряд в скрещенных  $E \times H$  полях, системы электропитания плазменных эмиссионных систем.*

**Введение.** Развитие промышленности требует создания деталей с поверхностными слоями, обладающими комплексом заданных свойств. К наиболее распространенным методам поверхностной обработки применительно к конструкционным материалам можно отнести ионное модифицирование и электронно-лучевое воздействие. Одним из путей существенного повышения эксплуатационных свойств поверхностей является использование комбинированных методов их инженерии. При этом сочетание двух способов обработки, как правило, приводит к появлению новых эффектов, не обеспечиваемых каждым из способов в отдельности. Накопленный опыт свидетельствует о перспективности использования плазменных источников заряженных частиц на основе разряда в скрещенных  $E \times H$  полях для реализации таких комбинированных технологий обработки поверхностных слоев, поскольку плазменные источники не утрачивают работоспособности при воздействии паров металлов, в том числе тугоплавких, и газовых выбросов из зоны термического воздействия, имеют большой ресурс, удобны в эксплуатации не содержат редких и дорогостоящих материалов. Совокупность этих свойств не только позволяет использовать источники с плазменным эмиттером в традиционных электронно-лучевых технологиях, но и разрабатывать на их основе новые технологии термического воздействия на материалы. [1–3].

Существуют основания предполагать, что создание новых конструкций источников с плазменным эмиттером для реализации комбинированных ресурсосберегающих технологий электронно-ионно-плазменной обработки поверхностных слоев на их основе позволит снизить себестоимость продукции за счет сокращения длительности процесса ионно-плазменной обработки, снизить энергозатраты, а также повысить эксплуатационные характеристики изделий путем создания поверхностного покрытия с требуемыми свойствами. Для решения этой задачи представляется перспективной разработка высокопервеансных источников низко- и высокоэнергетичных (в зависимости от области применения) пучков заряженных частиц.

Первеанс  $P$  является мерой интенсивности потока заряженных частиц, характеризует влияние объемного заряда на пучок заряженных частиц и равен отношению тока  $I$  пучка частиц к эквивалентному ускоряющему напряжению  $U$  в степени три вторых в данной точке [4]:

$$P = \frac{I}{U^{3/2}}$$

Современная теория и опыт применения плазменных источников ионных и электронных пучков показывают, что диодные структуры с плазменными эмиттерами зарядов автоматически обеспечивают повышенный первеанс при заданной плотности эмиссионного тока [5]. Это обусловлено невозможностью формирования ленгмюровского минимума потенциала вблизи плазменного эмиттера вследствие возможности одновременной эмиссии из плазмы как электронов, так и ионов [6]. Эта возможность приводит к автоматическому перемещению каждого элемента поверхности эмиттирующей плазмы до реализации условия нулевого градиента потенциала на всей поверхности. Таким образом, диод с плазменным эмиттером работает в режиме насыщения, когда ток эмиссии равен току анода диодного промежутка.

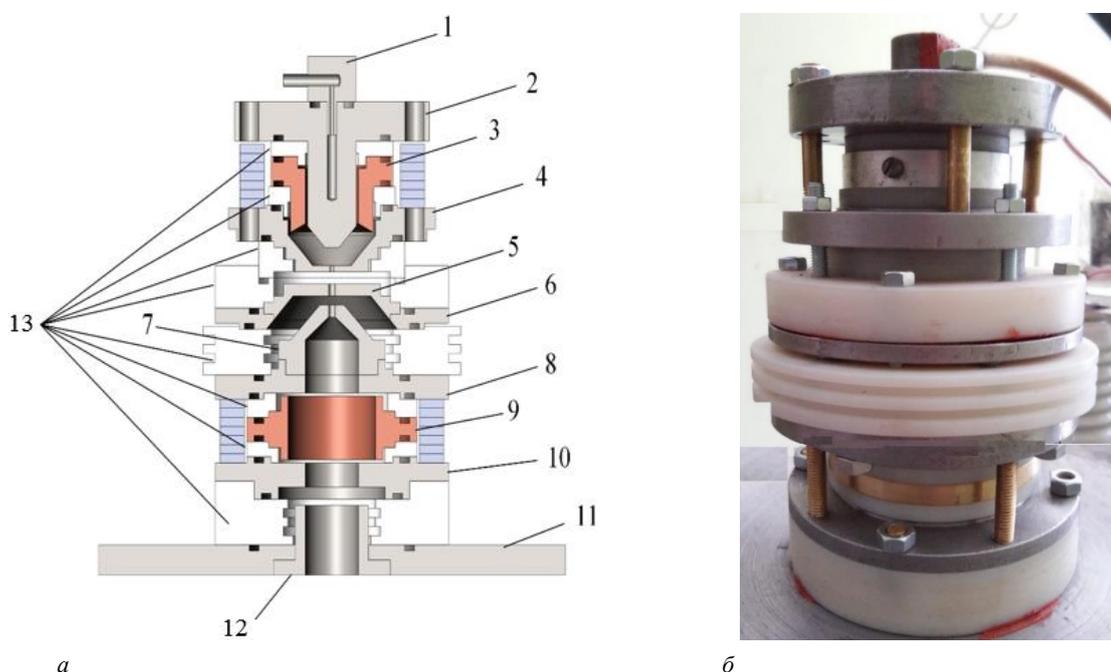
Дальнейшее повышение первеанса в диоде с плазменным эмиттером возможно за счет компенсации объемного заряда тока в диоде (электронном или ионном) зарядами другого типа во всем диодном промежутке. Такая ситуация реализуется, в частности, в возникающих при определенных условиях в плазме

двойных электрических слоях. Такие слои можно рассматривать как диоды с плазменным эмиттером и плазменным анодом. Первеанс двойных электрических слоев можно считать максимальным для заданной плотности тока в слое (диода).

Анализ известных конструкций плазменных источников заряженных частиц (электронов) и основных физических процессов в них показывает, что существует возможность модификации этих структур с целью создания более эффективных условий формирования плазмы и получения тока эмиссии, без существенного усложнения конструкции и изменения систем электропитания. Используя теорию электростатических линз и известные принципы получения пучков большого сечения, например, можно предложить систему формирования и ускорения электронных пучков, близкую по основным параметрам к иммерсионным электростатическим линзам (источники первого типа), или газоразрядные структуры с двойными электрическими слоями (источники второго типа).

В данной работе представлен макет конструкции плазменного источника заряженных частиц в скрещенных  $E \times H$  полях с повышенным первеансом.

**Описание макета.** На основе предложенной модели [7] была разработана экспериментальная конструкция плазменного источника заряженных частиц с повышенным первеансом, электродная структура которого и внешний вид приведены на рисунке 1.



1 – канал для напуска плазмообразующего газа; 2 – катод; 3 – главный анод; 4 – отражательный катод; 5 – эмиттерный электрод; 6 – вспомогательный катод; 7 – ускоряющий электрод; 8, 10 – катоды; 9 – анод; 11 – фланец для установки структуры на рабочую камеру; 12 – согласующий электрод; 13 – изоляторы

**Рисунок 1. – Внешний вид (а) и внутренняя структура (б) разработанного макета источника с повышенным первеансом**

Плазма, через часть поверхности которой осуществляется отбор (эмиссия) электронов, формируется в объеме, ограниченном внутренними поверхностями катода 2, отражательного катода 4, главного анода 3 и эмиттерного электрода 5. Указанные электроды разделены изоляторами. Катоды 2 и 4 являются накопниками постоянного магнита, создающего между ними магнитное поле, которое способствует осцилляции вторичных  $\gamma$ -электронов с катодов в пространство формирования плазмы. Электроды 5, 6 и 7 образуют промежуток ускорения электронов, где формируется поверхность плазмы, эмитирующая электроны. Электроды 8–10 образуют газоразрядную структуру, формирующую плазму, являющуюся источником ионов. Эта структура представляет собой ячейку «пеннинговского» типа [8]. Одновременно с этим магнитное поле, формируемое катодами 8, 9, образует некоторую магнитную фокусирующую систему для ускоренного электронного пучка, распространяющегося вдоль оси этой газоразрядной структуры до выхода из источника в технологическую камеру. На рисунке 2 приведены вольтамперные характеристики разряда камер источника. Они соответствуют типичным газоразрядным характеристикам источников данного типа.

На рисунке 3 приведена схема подключения электродов разработанного макета электронного источника с повышенным первеансом к системе электропитания. Предполагалось, что взаимосвязь раздельно управляемых разрядов в структуре будет способствовать повышению степени ионизации газа при пониженном давлении.

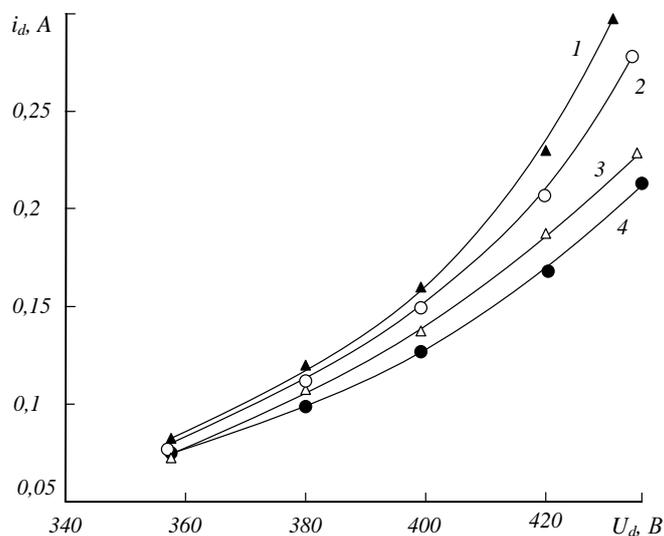
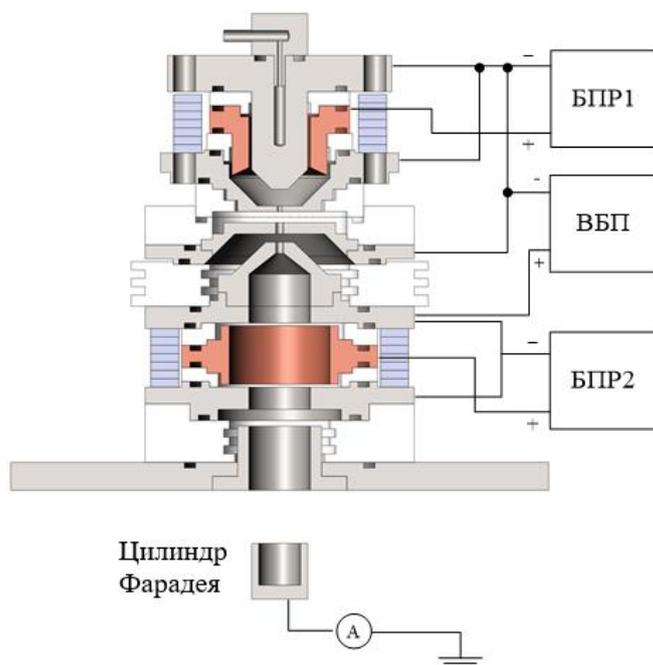


Рисунок 2. – Вольтамперные характеристики разряда для (1, 2) верхней (см. рисунок 1, а, электроды 2–5) и (3, 4) нижней (см. рисунок 1, а, электроды 8–10) разрядных камер при одновременном формировании разрядов в указанных камерах.  
Напуск газа  $Q$ : 1, 3 –  $3,5 \text{ мПа}\cdot\text{м}^3/\text{с}$ ; 2, 4 –  $2,2 \text{ мПа}\cdot\text{м}^3/\text{с}$ ;



БПР – блок питания разряда ( $U_p, I_p$ ), напряжение до 1000 В, ток до 1,5 А;  
ВБП – высоковольтный блок питания ( $U_y$ ), напряжение до 5 кВ, ток до 1 А

Рисунок 3. – Схема подключения электродов разрядных камер макета электронного источника на основе разряда в скрещенных  $E \times H$  полях с повышенным первеансом

Предполагается следующий механизм работы: электронный пучок, формируемый в верхней камере (см. рисунок 1, а, электроды 2–5), попадает после ускорения в структуру, образованную электродами нижней камеры (см. рисунок 1, а, электроды 8–10), где в разряде низкого давления формируется эмитирующая

ионы плазма. Сформированный электронный пучок, распространяясь вдоль оси структуры, повышает степень ионизации плазмы в этом разряде. Ионы распространяются в верхнюю структуру, повышают ионизацию газа в области отбора электронов и плотность эмиссионного тока и частично компенсируют электронный объемный заряд в ускоряющем промежутке, что в целом должно приводить к увеличению первеанса источника.

О реализации этого механизма свидетельствует изменение наклона вольтамперных характеристик извлечения при наличии (рисунок 4, кривые 4–6 и рисунок 5, кривые 3–5) инициации разряда в нижней разрядной камере (см. рисунок 1, а, электроды 8–10) в сравнении с его отсутствием (рисунок 4, кривые 1–3 и рисунок 5, кривые 1, 2). Вид характеристик свидетельствуют 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 нижней разрядной камере (см. рисунок 1, а, электроды 8–10).

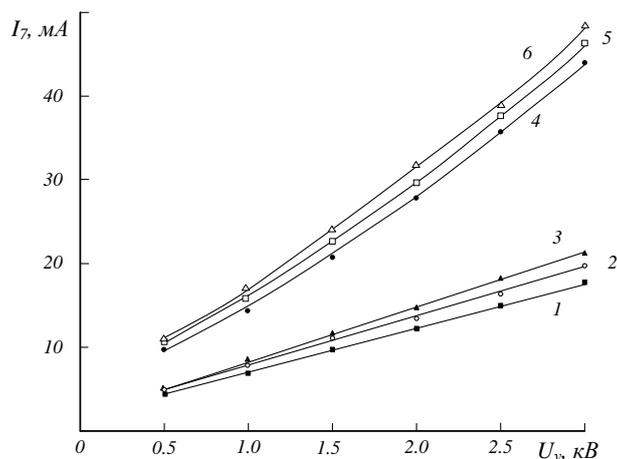
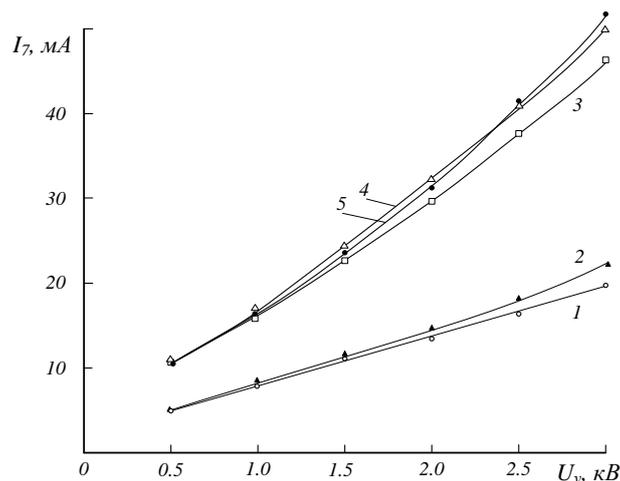


Рисунок 4. – Ток  $I_7$  (в цилиндр Фарадея) при отсутствии (1–3) и наличии (4–6) инициации разряда в нижней разрядной камере (см. рисунок 1, а, электроды 8–10) для различных напусков газа  $Q$ :  $I_p$  в верхней камере (см. рисунок 1, а, электроды 2–5) 200 мА, напряжение горения разряда 420 В;  $I_p$  в нижней камере (см. рисунок 1, а, электроды 8–10) 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



1–5 – напуск газа  $Q = 0,1 \cdot 10^{-4}$  л/с;  
 $I_p$  в верхней камере (см. рисунок 1, а, электроды 2–5): 1, 3, 5 – 200 мА, напряжение горения разряда 420 В;  
 2, 4 – 240 мА, напряжение горения разряда 450 В  
 3, 4 –  $I_p$  в нижней камере (см. рисунок 1, а, электроды 8–10) 180 мА, напряжение горения разряда 410 В;  
 5 –  $I_p$  в верхней камере (см. рисунок 1, а, электроды 2–5) 210 мА, напряжение горения разряда 430 В;  
 Рисунок 5. – Ток  $I_7$  (в цилиндр Фарадея) при отсутствии (1–2) и наличии (3–5) инициации разряда в нижней разрядной камере (см. рисунок 1, а, электроды 8–10) для различных токов разряда в верхней и нижней камерах

**Заключение.** Наряду с известными способами, повышающими переключение электронного тока из плазмы в ускоряющий промежуток (эмиссионный ток) в плазменных источниках заряженных частиц, существенное повышение первеанса плазменных источников как высокоэнергетических, так и низкоэнергетических пучков обеспечивается заполнением ускоряющего электроны промежутка ионами, компенсирующими объемный заряд электронного пучка. При этом для повышения первеанса плазменных источников электронов в непрерывном режиме целесообразно использовать ускоряющий электрод в виде плазменной поверхности, которая ускоряет электроны и одновременно эмитирует ионы в ускоряющий электроны промежуток. Для этого ускоряющий электрод должен быть элементом электродной газоразрядной структуры, формирующей плазму. Между эмитирующей электроны плазмой и плазмой ускоряющего электрода формируется двойной электрический слой с высоким первеансом для ускоряемого электронного пучка. При этом для каждого конкретного практического технологического применения высокопервеансного плазменного источника электронов целесообразна адаптация исследованных электродных структур источника на основе требований к условиям его работы и требований к параметрам (качеству) электронного пучка.

Полученные результаты свидетельствуют о возможности и перспективности применения представленного источника для разработки высокопервеансного источника для промышленного применения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Барченко, В.Т. Плазменные эмиссионные системы с ненакаливаемыми катодами для ионно-плазменных технологий / В.Т. Барченко. – СПб. : Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011. – 220 с.
2. Плазменные эмиссионные системы для электронно-лучевых технологий. Ч. 1 / Д.А. Антонович [и др.]. // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С, Фундаментальные науки. – 2016. – № 12. – С. 37–44.
3. Плазменные эмиссионные системы для электронно-лучевых технологий. Ч. 2 / Д.А. Антонович [и др.]. // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С, Фундаментальные науки. – 2017. – № 4 – С. 45–51.
4. Молоковский, С.И. Интенсивные электронные и ионные пучки / С.И. Молоковский, А.Д. Сушков. – Л. : Энергия, 1972. – 274 с.
5. 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.
6. Чен, Ф. Введение в физику плазмы / Ф. Чен. – М. : Мир, 1987. – 398 с.
7. Antonovich, D.A. 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.
8. Coating by Cathode Disintegration : pat. US 2,146,025 / Penning F.M. ; N.V. Philips, Gloeilampenfabrieken, Eindhoven, The Netherlands. – 1939.

Поступила 12.03.2020

#### POSSIBILITY OF INCREASING PERVEANCE IN PLASMA EMISSION SYSTEMS BASED ON DISCHARGE IN CROSSED $E \times H$ FIELDS

S. ABRAMENKO, D. ANTONOVICH, V. GRUZDEV, P. SOLDATENKO

*An analysis of the known designs of plasma sources of charged particles and the basic physical processes in them shows that it is possible to modify these structures in order to create more effective conditions for the formation of plasma and to obtain an emission current, without significantly complicating the design and changing the power supply systems. The paper presents a mock-up of the design of a plasma source of charged particles in crossed  $E \times H$  fields with an increased perveance. Its electrode structure is given, the source's mechanism of operation is proposed, the main characteristics are given, and the prospects for further development of a high-perveance source for industrial applications based on it are shown.*

**Keywords:** perveance, plasma emission systems, plasma emitter, beam current pulses, discharge in crossed  $E \times H$  fields, power systems for plasma emission systems.