

**ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПЛАЗМЫ И ПУЧКОВ
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В УСТРОЙСТВАХ С ПЛАЗМЕННЫМ ЭМИТТЕРОМ**

М. А. СКОВОРОДКО

*(Полоцкий государственный университет
имени Евфросинии Полоцкой, Новополоцк);*

канд. техн. наук, доц. Д. А. АНТОНОВИЧ

*(Витебский государственный университет
имени П.М. Машерова, Витебск)*

Представлены электродные конструкции плазменных источников заряженных частиц различных типов, рассмотрены основные физические процессы, сопровождающие формирование эмиттирующей плазмы в рассматриваемых конструкциях, показаны возможность модификации этих структур для создания более эффективных условий формирования плазмы и разработке на их основе перспективных конструкций источников широкого технологического назначения.

Ключевые слова: *плазменный источник заряженных частиц, электронно-ионно-лучевые технологии, пучки заряженных частиц.*

Введение. К настоящему времени лучевые технологии нашли достаточно широкое применение в различных отраслях. Это стимулировало разработку источников заряженных частиц, реализующих широкий спектр технологических параметров. При этом, определенными преимуществами при реализации ряда технологий пользуются источники заряженных частиц с плазменными эмиттерами, способными формировать как электронные, так и ионные пучки без существенного усложнения конструкции и изменения систем электропитания, что обусловило достаточно широкое их применение [1–3]. В работе представлены электродные конструкции ряда типов источников с плазменным эмиттером и рассмотрены основные физические процессы, сопровождающие формирование эмиттирующей плазмы в данных конструкциях.

Основная часть. При разработке плазменных источников заряженных частиц основной задачей является оптимизация условий генерации плазмы и системы формирования пучков. Одними из наиболее используемых, конструкций оказались источники с плазменным эмиттером на основе разряда с полым катодом [1–3] определенными перспективами и достоинствами обладают конструкции на основе разряда в скрещенных $E \times H$ полях [2–5].

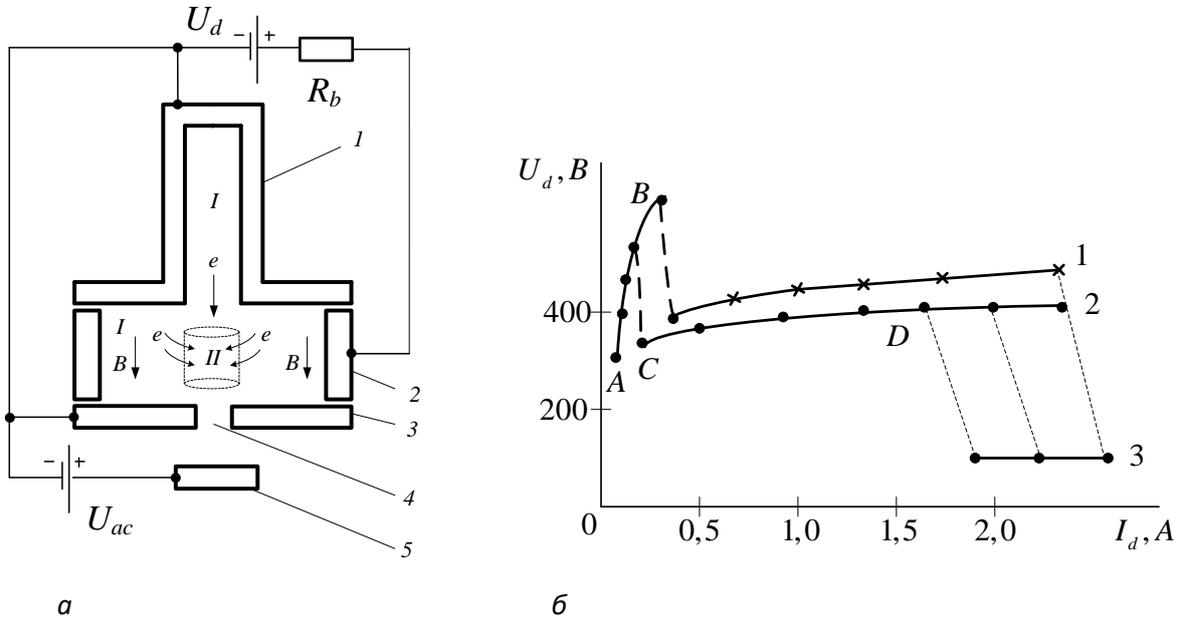
При технологическом использовании электрофизических устройств необходимо, чтобы формируемые пучки соответствовали определенным требованиям. Например, для получения электронных пучков в разряде должна формироваться плазма, обеспечивающая высокую плотность эмиссионного тока (не менее 10^4 А/см² для сфокусированных пучков и не менее 10 А/см² для широких пучков), т. е. концентрация плазмы в области извлечения должна быть порядка 10^{18} м⁻³ [2, 6, 7]. А для получения ионных пучков плотность ионного воздействия должна составлять 10 мА/см² и выше, что также требует создание плазмы с плотностью не ниже 10^{17} м⁻³ [2, 6, 7].

В существующих конструкциях с плазменным эмиттером, для получения пучков большого сечения (ПБС) необходимо наличие трех областей: разрядной камеры (создается плазма высокой концентрации), электрода-расширителя (формируется эмитирующая плазменная поверхность определенной площади) и ускоряющего промежутка. Область расширителя и ускоряющего промежутка соединена системой эмиссионных каналов, через которые и осуществляется выход частиц в область ускорения и формирования пучка. При этом потенциал данного электрода с отверстиями должен иметь определенное значение, обеспечивающее требуемые параметры плазмы в расширителе. Однако этот же электрод, являясь элементом газоразрядной структуры, влияет и на условия формирования разряда и параметры плазмы. Кроме этого на параметры плазмы оказывают влияние потенциал электрода-расширителя и его геометрические данные. Поэтому для стабилизации плазменной поверхности в электроде-расширителе применяются сеточные эмиттерные электроды. Необходимость их использования вызвана нестабильностью плазменной поверхности большой площади и высокой подвижностью плазменной поверхности вглубь электрода-расширителя при увеличении ускоряющего напряжения. Для установления плазменной поверхности необходимо выполнение динамического равенства ионного давления плазмы и давления электрического поля со стороны ускоряющего промежутка. Если такое равновесие установлено, то любые изменения параметров плазмы или ускоряющего поля приведут к смещению плазменной границы. В то же время, уменьшить подвижность плазменной поверхности можно за счет уменьшения градиента потенциала ускоряющего поля, но такой метод может применяться только для получения сфокусированных электронных пучков в плазменных источниках, для ПБС данный метод неприменим. Поэтому для получения ПБС применяются сеточные электроды, которые должны обладать наибольшей геометрической прозрачностью для обеспечения высокой эффективности извлечения.

Рассмотрим основные механизмы формирования плазмы в газоразрядных структурах с полым катодом и в скрещенных полях.

Плазменные источники на основе разряда с полым катодом.

Газоразрядные структуры с полым катодом используются в плазменных источниках с высокой плотностью эмиссионного тока. На рисунке 1 представлена электродная структура и вольтамперная характеристика разрядов с полым катодом.



а – электродная система: 1 – полый катод; 2 – анод; 3 – отражательный катод; 4 – эмиссионный канал; 5 – ускоряющий (извлекающий) электрод;
б – вольтамперная характеристика: *AB* – тлеющий разряд в отсутствии эффекта полого катода; *CD* – тлеющий разряд с полым катодом; *D* – дуга с катодным пятном и холодным катодом; кривая 1 – соответствует отражательному разряду, напряжение горения ~600В; кривая 2 – переход разряда в стадию разряда с полым катодом; U_d – напряжение горения разряда; U_{ac} – ускоряющее напряжение; R_b – балластное сопротивление;
B – индукция магнитного поля. Величина напуска плазмообразующего газа (воздух)
 1 – $Q = 0.2 \cdot \text{мПа м}^3/\text{с}$; 2 – $Q = 0.3 \cdot \text{мПа м}^3/\text{с}$

Рисунок 1. – Отражательный разряд с полым катодом [10]

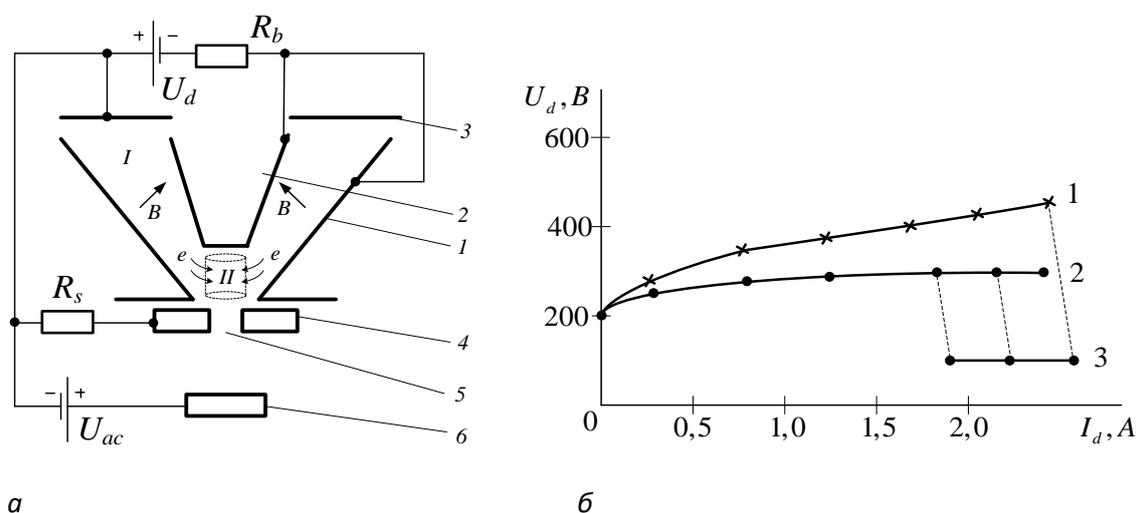
Возникновение ионизационных процессов происходит между плоскими частями катодов 1, 3 с продольным к поверхности анода магнитным полем, которое препятствует уходу электронов из плазмы на анод. На этом этапе, соответствующем отражательному разряду (рисунок 1 а, область II, рисунок 1 б, кривая 1), за счет увеличения концентрации плазмы возбуждается эффект полого катода. Происходит переход разряда в стадию разряда с полым катодом (рисунок 1 б, кривая 2), ток разряда резко повышается, а напряжение горения снижается (осуществляется процесс проникновения плазмы в полость I). При иницировании разряда с полым катодом, сохраняя требуемые характеристики зажигания и горения разряда, приходится усложнять систему электропитания плазменных источников, при этом затрудняется получение слаботоковых электронных пучков.

Кроме этого, ионная бомбардировка эмиттерного электрода с катодным потенциалом влияет на газодинамические условия и снижает ресурс плазменных источников. Но увеличение ресурса можно добиться путем повышения потенциала эмиттерного электрода. Для этого в конструкцию пушки добавляется дополнительный изолированный электрод, в качестве эмиттерного. Это не усложняет систему электропитания, но при этом может увеличить эффективность извлечения электронов.

Таким образом, разряды с полым катодом используются при получении ПБС в источниках, которые способны работать в стационарном или импульсном режиме длительное время, относительно времени установления разряда.

Плазменные источники на основе разряда со скрещенными $E \times H$ полями.

Получение ПБС с требуемыми параметрами можно добиться используя электродную структуру на основе разряда со скрещенными $E \times H$ полями (рисунок 2 а). На рисунке 2 б представлены вольтамперные характеристики данного разряда.



а – электродная система [13, 14]: 1 – внешний катод; 2 – внутренний катод; 3 – анод; 4 – эмиттерный электрод; 5 – эмиссионный канал; 6 – ускоряющий (извлекающий) электрод;
б – вольтамперные характеристики: газ (воздух): 1 – 2.8 мПа м³/с; 2 – 1.7 мПа м³/с; 3 – 1.25 мПа м³/с; U_d – напряжение горения разряда; U_{ac} – ускоряющее напряжение; R_s – сопротивление смещения; R_b – балластное сопротивление; B – индукция магнитного поля

Рисунок 2. – Разряд в структуре со скрещенными $E \times H$ полями

Возникновение ионизационных процессов происходит между катодами 1 и 2. Дополнительный электрод 4 (выполняет роль эмиттерного) способствует тому, что формирующаяся плазма диффундирует в область эмиссионного канала (область II). За счет присутствия магнитного поля во всем объеме разрядной структуры ионизация газа эффективна. В такой структуре исключается этап инициирования разряда (рисунок 2 б). Извлечение электронов осуществляется через эмиссионный канал 5 в эмиттерном электроде 4, который имеет потенциал близкий

к анодному. Но из-за поперечной компоненты вектора индукции, движение электронов в область эмиссионного канала затрудняется.

Значение потенциала эмиттерного электрода, играющего роль вспомогательного анода, не так важно при возбуждении разряда, как значение потенциала в случае разряда с полым катодом. Поэтому для повышения эффективности извлечения частиц, значение потенциала эмиттерного электрода может изменяться от анодного до практически катодного с помощью регулирования сопротивления смещения в схеме подключения (рисунок 2, R_s), либо иметь плавающий потенциал. Такая возможность падения потенциала на пристеночном слое эмиттерного электрода позволяет увеличить ресурс эмиссионного канала. Таким образом, открываются новые возможности экспериментальной оптимизации устройства и условий формирования плазмы.

Анализируя вольтамперные характеристики областей рабочих значений токов двух рассматриваемых типов разрядов, видим, что существует возможность использования одного и того же универсального типа источника электропитания.

Представленные электродные структуры послужили основой для разработки широкого спектра конструкций плазменных источников заряженных частиц различного технологического назначения и являются перспективными для разработки на их основе комбинированных источников заряженных частиц (электронов и ионов) [8].

ЛИТЕРАТУРА

1. Крейндель Ю. Е. Плазменные источники электронов. – М.: Атомиздат, 1977. – 145 с.
2. Плазменные эмиссионные системы с ненакаливаемыми катодами для ионно-плазменных технологий / В. Т. Барченко [и др.], под общ. ред. В. Т. Барченко // СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011. – 220 с.
3. Antonovich, D. A. Experience of forming combined low-energy electron-ion beams in plasma sources of charged particles / D. A. Antonovich, V. A. Gruzdev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 759. – P. 1–7.
4. Plasma emission systems for electron- and ion-beam technologies / D. Antonovich, V. Gruzdev, V. Zaleski, I. Pobol & P. Soldatenko // High Temperature Material Processes 21(2):143–159 (2017).
5. Multi-bit structure for the formation of combined or alternating electron-ion beams / D. Antonovich [et al.] // High Temperature Material Processes: An International Quarterly of High-Technology Plasma Processes. – 2020. – Vol. 24, № 2. – P. 147–156.
6. Шиллер, З. Электронно-лучевые технологии / З. Шиллер, У. Гайзиг, З. Панцер. – М. : Энергия, 1980. – 528 с.
7. Источники электронов с плазменным катодом: физика, техника, применения / под ред. Е. М. Окс – Томск: НТЛ, 2005. – 216 с.
8. 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. Zaleski // Russian Physics Journal. – 2021. – Vol. 63, № 10. – P. 1713–1720.