

## ФИЗИКА

УДК 537.533; 621.384

### СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ В ИСТОЧНИКАХ С ПЛАЗМЕННЫМ ЭМИТТЕРОМ

канд. техн. наук Д.А. АНТОНОВИЧ, д-р техн. наук, проф. В.А. ГРУЗДЕВ,  
канд. физ.-мат. наук, доц. В.Г. ЗАЛЕССКИЙ, И.С. РУСЕЦКИЙ  
(Полоцкий государственный университет)

*Представлены некоторые результаты экспериментального исследования способов повышения эффективности извлечения электронов при сохранении стабильности параметров разряда и тока эмиссии, на примере плазменного эмиттера с анодным потенциалом эмиттерного электрода. Предложенные способы основаны на физических особенностях формирования эмиттирующей плазмы и эмиссионного тока в плазменных эмиттерах. В одном из рассматриваемых способов реализуется автосмещение потенциала эмиттерного электрода разрядной камеры плазменного эмиттера, что позволяет не только повысить эффективность извлечения, но и обеспечить автостабилизацию тока эмиссии. Другой способ определяется процессами в плазме и основан на перераспределении параметров плазмы в разрядной камере и формировании дополнительных потоков плазменных электронов в область эмиссии за счет изменения конфигурации электрических и магнитных полей без изменения конструкции плазменного эмиттера.*

**Введение.** Одним из возможных способов получения высокоэнергетичных электронных пучков является эмиссия электронов из плазмы низковольтных газовых разрядов. Плазма газового разряда при этом формируется в плазменном эмиттере – электроразрядном устройстве, из которого электроны через канал (отверстие) в одном из электродов разрядной камеры (эмиттерный электрод) выходят в ускоряющий промежуток, где формируется электронный пучок [1].

В настоящее время разработан ряд конструкций плазменных эмиттеров, в которых реализуются различные способы формирования эмиттирующей плазмы. Наиболее широкое практическое применение нашли плазменные эмиттеры на основе тлеющих газовых разрядов [1 – 3]. Плотность мощности, которую обеспечивают плазменные источники электронов (ПИЭЛ) такого типа, лежит в пределах  $10^6 \dots 10^9$  Вт/м<sup>2</sup>, что позволяет реализовать ряд электронно-лучевых технологий, например, сварка и наплавка [4]. При этом мощность электронного пучка в ПИЭЛ, как правило, не превышает 10 кВт и в большинстве случаев соответствует диапазону 3...6 кВт. Ограничение мощности электронного пучка в ПИЭЛ обусловлено несколькими объективными причинами. Во-первых, увеличение мощности электронного пучка за счет повышения ускоряющего напряжения представляется малоперспективным, поскольку использование ускоряющих напряжений свыше 40 кВ требует принятия существенных мер по электротехнической и радиационной защите, что не всегда приемлемо на промышленных предприятиях. Поэтому типичные ускоряющие напряжения в ПИЭЛ, как правило, составляют 30...40 кВ. Во-вторых, что более существенно, ток эмиссии  $i_e$  из плазмы ограничен и согласно существующим представлениям о стабильности горения разряда в условиях эмиссии из него электронов [5] эффективность извлечения электронов из плазмы  $\alpha$  ( $i_e = \alpha i_d$ ) не должна превышать 30...40 % [6, 7] разрядного тока  $i_d$ . Увеличение тока разряда не решает задачу повышения мощности электронного пучка, поскольку с ростом разрядного тока возрастает мощность, рассеиваемая электродами разрядной камеры, что требует принятия дополнительных мер по их охлаждению [8], необходимых для обеспечения стабильности параметров плазменного эмиттера и необходимого ресурса работы плазменного эмиттера. Кроме того, при превышении разрядным током величины порядка 1 А, газовый разряд может переходить в нестабильное состояние, обусловленное самопроизвольным локальным разогревом электродов и возникновением дуговых катодных микропятен на их поверхности, что приводит к самопроизвольному переходу тлеющего разряда в дуговую форму и обратно. Поэтому типичное значение разрядного тока в ПИЭЛ, как правило, не превышает 0,6 А и тока пучка составляет 0,1...0,15 А [4]. Тем не менее существует ряд технологических задач [9, 10], для решения которых необходимо использовать электронные пучки повышенной мощности – 10...15 кВт. Очевидно, что наиболее перспективным в этом случае представляется поиск условий, способствующих повышению эффективности извлечения электронов  $\alpha$  при сохранении стабильности параметров пучка.

В данной работе представлены некоторые результаты экспериментального исследования способов повышения эффективности извлечения в ПИЭЛ на примере плазменного эмиттера на основе разряда в скрещенных полях с анодным потенциалом эмиттерного электрода.

**Особенности эмиссии электронов из плазмы.** В плазменном эмиттере газоразрядная плазма, как правило, имеет положительный потенциал относительно электродов разрядной камеры и отделена от них, в том числе и от эмиттерного электрода, пристеночным слоем объемного ионного заряда [3, 11]. Электронам, чтобы выйти из плазмы в ускоряющий промежуток, необходимо преодолеть некоторый потенциальный барьер, который зависит от потенциала эмиттерного электрода в системе электропитания разряда и параметров плазмы. В общем случае потенциал эмиттерного электрода может быть катодным, анодным или промежуточным. В результате эффективность извлечения зависит не только от соотношения площадей  $S_e/S_a$  ( $S_e$  – площадь сечения эмиссионного канала в эмиттерном электроде, через который осуществляется эмиссия электронов из плазмы;  $S_a$  – суммарная площадь электродов разрядной камеры, например, анода, на которые могут уходить плазменные электроны), но и от параметров плазмы и приэлектродного слоя в области эмиссионного канала, а также от ускоряющего напряжения [3]. Поэтому для достижения стабильности тока пучка в плазменных эмиттерах реализуют такие условия эмиссии (геометрия эмиссионного канала и ускоряющего промежутка, параметры плазмы), чтобы в требуемом диапазоне разрядных токов и ускоряющих напряжений эффективность извлечения  $\alpha$  представляла собой постоянный параметр. При этом высокая плотность тока эмиссии может быть достигнута за счет неоднородности распределения концентрации плазмы в разряде, что реализуется, например, в разрядах с полым катодом [1 – 3] благодаря высокой концентрации плазмы в области эмиссии. Однако в этом случае эмиссионный канал выполняется в катод, имеющем значительный отрицательный потенциал относительно эмиттирующей плазмы (несколько сотен вольт). Вследствие этого толщина слоя пространственного заряда, отделяющего плазму от эмиттерного электрода, достаточно большая, что приводит к необходимости использовать эмиссионные каналы достаточно большого диаметра для достижения в плазменном источнике электронов эффективности извлечения электронов 30...40 %. Дальнейшее увеличение диаметра эмиссионного канала, которое могло бы обеспечить повышение эффективности извлечения, ограничено снижением электрической прочности ускоряющего промежутка, поскольку эмиссионный канал обеспечивает необходимый для работы плазменного эмиттера перепад давления между разрядной камерой и ускоряющим промежутком.

В плазменных эмиттерах с анодным потенциалом эмиттерного электрода [12], электродная структура которого показана на рисунке 1, эффективность извлечения также не превышает 40 %, что обусловлено невозможностью создания существенной неоднородности концентрации плазмы в области извлечения в условиях интенсивного стока плазменных электронов на электрод с анодным потенциалом.

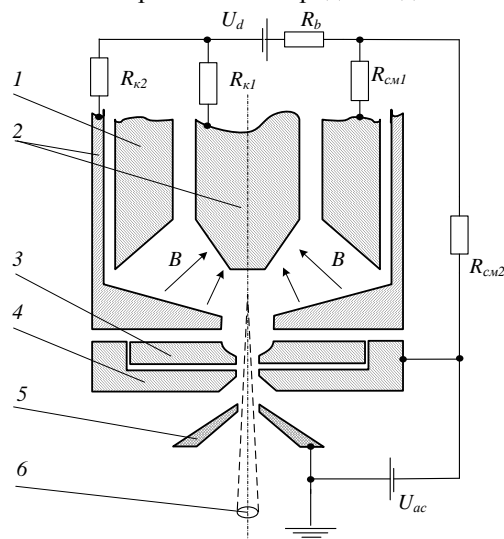


Рис. 1. Электродная структура разрядной камеры плазменного эмиттера с анодным потенциалом эмиттерного электрода:

- 1 – анод; 2 – внешний и внутренний катоды; 3 – вставка в эмиттерный электрод;
- 4 – эмиттерный электрод; 5 – экстрактор; 6 – электронный пучок;  $B$  – индукция магнитного поля;
- $U_d$  – напряжение питания разряда;  $U_{ac}$  – ускоряющее напряжение;  $R_b$  – балластное сопротивление;
- $R_{cm1}$ ,  $R_{cm2}$  – сопротивления смещения потенциала анода и эмиттерного электрода соответственно;
- $R_{k1}$ ,  $R_{k2}$  – сопротивления смещения потенциала внутреннего и внешнего катодом соответственно

Диаметр эмиссионного канала в этом случае может быть меньшим по сравнению с диаметром эмиссионного канала в плазменных эмиттерах с катодным потенциалом эмиттерного электрода. Это позволяет увеличить эффективность извлечения за счет повышения в разрядной камере давления и, соответственно,

концентрации плазмы. Однако повышение давления в разрядной камере, так же как и в случае с увеличением диаметра эмиссионного канала, приводит к снижению электрической прочности ускоряющего промежутка. Поэтому наиболее эффективным с точки зрения повышения эффективности извлечения является управление параметрами приэлектродного слоя в эмиссионном канале. Как показано в работе [13], эффективность извлечения в существенной степени зависит также и от перераспределения токов в разряде, инициируемого в том числе и отбором электронов из плазмы. В результате высокая эффективность извлечения электронов из плазмы может быть реализована как за счет создания условий для перераспределения токов между эмиттерным электродом и эмиссией в эмиссионном канале, так и вследствие формирования в объеме эмиттирующей плазмы полей, обеспечивающих формирование потоков плазменных электронов в область эмиссионного канала.

**Управление параметрами приэлектродных слоев.** Параметрами приэлектродных слоев можно управлять смещением потенциала электрода, контактирующего с плазмой. Одним из возможных способов является применение дополнительного источника питания, формирующего напряжение смещения. Однако в этом случае возникает проблема согласования потенциала смещения с током эмиссии (обратной связи), что в целом усложняет систему электропитания и управления плазменным эмиттером. Также возможно создание разрядной камеры с оптимальной, с точки зрения высокой эффективности извлечения электронов, структурой электродов. Однако это также малоэффективно, поскольку такая конструкция может оказаться не оптимальной для зажигания разряда, так как для зажигания разряда потребуется создать значительные перенапряжения в системе электропитания, что нежелательно для стабильности технологического режима плазменного эмиттера. Один из способов устранения такого несоответствия – автоматическая перестройка разряда в процессе перехода его из режима зажигания к режиму горения (рабочему), в котором и реализуется требуемая конфигурация полей для достижения высокой степени переключения электронного тока из плазмы в пучок.

Наиболее простым способом, обеспечивающим автосмещение потенциалов электродов без усложнения схемы электропитания плазменного эмиттера, является включение сопротивлений смещения в цепи одного из электродов (анода –  $R_{cm1}$  или эмиттерного электрода –  $R_{cm2}$ , см. рис. 1). При этом с увеличением тока на этот электрод величина падения напряжения на  $R_{cm}$  увеличивается, и потенциал этого электрода снижается относительно потенциала в отсутствие  $R_{cm}$  на соответствующую величину ( $i_a R_{cm1}$  или  $i_{em} R_{cm2}$ , где  $i_a$  – ток анода,  $i_{em}$  – ток эмиттерного электрода). В результате падение напряжения в слое между этим электродом и плазмой увеличивается, и величина электронного тока на этот электрод снижается.

Включение  $R_{cm1}$  в цепь анода (см. рис. 1) не приводит к изменению напряжения зажигания разряда, которое практически не отличается от напряжения горения и обуславливает незначительное его увеличение (на 10...15 В). Это приводит к увеличению тока эмиттерного электрода в отсутствие извлечения и способствует более интенсивному извлечению электронов за счет перестройки разряда без создания неоднородности распределения концентрации плазмы. В результате эффективность извлечения  $\alpha$  (рис. 2, кривая 2; рис. 3, б, кривая 1) и, соответственно, ток эмиссии  $i_e$  (рис. 3, а, кривая 1) также оказываются больше по сравнению с тем, когда  $R_{cm}$  в цепи анода отсутствует (рис. 2, кривая 1; и рис. 3, а и 3, б, кривые 2).

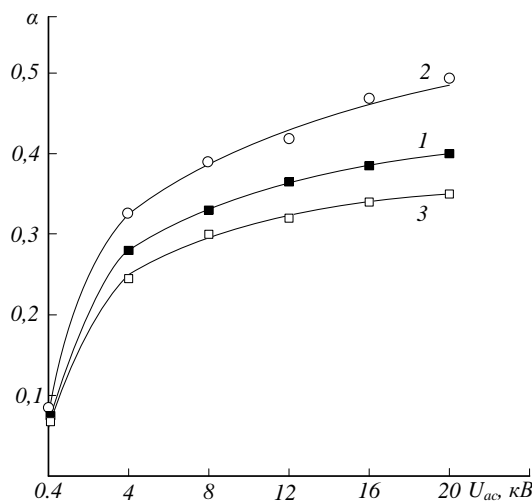


Рис. 2. Зависимость эффективности извлечения  $\alpha$  от ускоряющего напряжения для различных условий при напуске плазмообразующего газа  $Q = 100 \text{ см}^3/\text{ч}$  и токе разряда  $i_d = 0,2 \text{ А}$ :  
 1 –  $R_{cm1} = 0$ ,  $R_{cm2} = 0$ ; 2 –  $R_{cm1} = 500 \text{ Ом}$ ,  $R_{cm2} = 0$ ; 3 –  $R_{cm1} = 0$ ,  $R_{cm2} = 500 \text{ Ом}$

Необходимо отметить, что автосмещение потенциала эмиттерного электрода и катодов может быть использовано для автостабилизации режима горения разряда и величины эмиссионного тока. Включение сопротивления смещения  $R_{cm2}$  в цепь эмиттерного электрода, как и в предыдущем случае, не оказывает существенного влияния на напряжение зажигания и напряжение горения разряда. Однако с ростом тока эмиссии потенциал эмиттерного электрода становится более отрицательным относительно анода на величину  $i_{em} R_{cm2}$ . В результате при неконтролируемом увеличении тока эмиссии за счет, например, «всплеска» давления в рабочей камере падение напряжения в приэлектродном слое эмиттерного электрода увеличивается, толщина слоя растет, ток эмиссии снижается (рис. 3, а, кривые 3, 4). При этом эффективность извлечения также уменьшается (см. рис. 2, кривая 3 и рис. 3, б, кривые 3, 4). Поэтому в плазменном эмиттере с анодным потенциалом эмиттерного электрода для достижения стабилизирующего эффекта в цепь эмиттерного электрода необходимо включать сопротивление смещения  $R_{cm2}$  такой величины, чтобы это не приводило к существенному снижению эффективности извлечения, но обеспечило варьирование потенциала эмиттерного электрода в пределах 10...20 В во всем диапазоне изменения его тока.

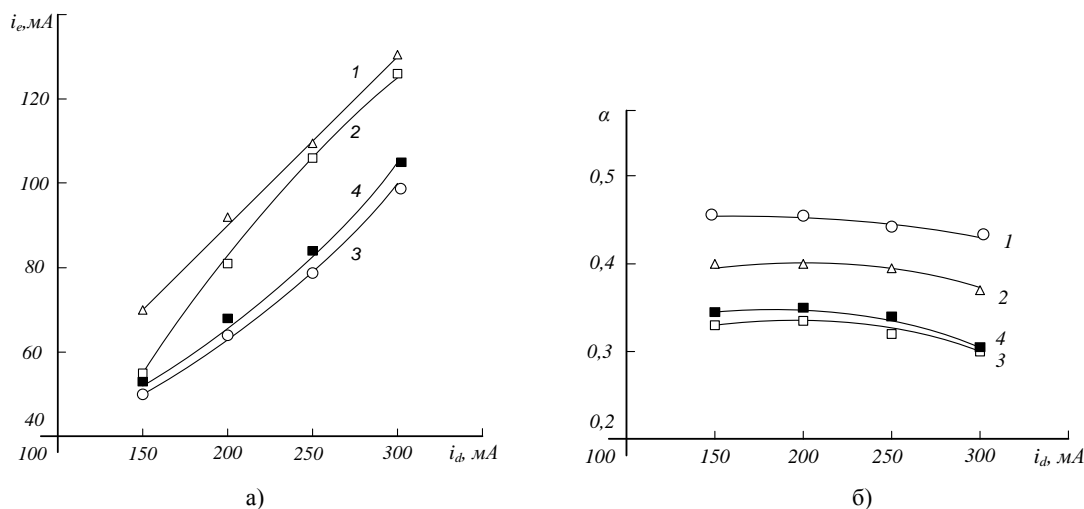


Рис. 3. Зависимость тока эмиссии  $i_e$  (а) и эффективности извлечения  $\alpha$  (б) от тока разряда при ускоряющем напряжении  $U_{ac} = 20$  кВ:

1 – 3 –  $Q = 100$  см<sup>3</sup>/ч; 4 –  $Q = 80$  см<sup>3</sup>/ч; 1 –  $R_{cm1} = 500$  Ом,  $R_{cm2} = 0$ ; 2 –  $R_{cm1} = 0$ ,  $R_{cm2} = 0$ ; 3, 4 –  $R_{cm1} = 0$ ,  $R_{cm2} = 500$  Ом

Аналогичный способ может быть использован для автостабилизации режима горения разряда (тока разряда), если в цепь питания одного из катодов (см. рис. 1) включить сопротивление смещения  $R_{k1}$  или  $R_{k2}$ . Включение сопротивлений смещения в цепь одного из катодов не отражается на условиях зажигания разряда, тогда как при случайном увеличении катодного тока его потенциал относительно плазмы повысится и суммарная энергия, которую вносят в разряд эмиттированные с катода электроны, уменьшится. В результате концентрация плазмы и, соответственно, ток разряда снизятся до первоначального значения.

**Изменение конфигурации электрического и магнитного полей.** Эффективность извлечения электронов из плазмы в значительной степени зависит от конфигурации магнитного поля в области эмиссионного канала. В отсутствие магнитного поля движение электронов в плазме является хаотическим и токи между эмиттерным электродом и эмиссионным каналом распределяются в соответствии с их площадями. В слабом магнитном поле электроны движутся преимущественно вдоль силовых линий, что позволяет перераспределять токи между электродами в зависимости от конфигурации магнитного поля в области извлечения электронов. Известны плазменные эмиттеры с анодным потенциалом эмиттерного электрода [1], в которых реализуется извлечение электронов поперек силовых линий магнитного поля, за счет локального искажения силовых линий. Это достигается использованием вставки из магнитомягкого материала в область эмиссионного канала эмиттерного электрода из немагнитного материала. Несмотря на то, что эффективность извлечения в таком устройстве оказывается недостаточной для его технологического применения [1], этот эффект может быть использован для повышения эффективности извлечения электронов в плазменных эмиттерах.

Изменение конфигурации магнитного поля обеспечивается путем использования составного эмиттерного электрода. Основная часть эмиттерного электрода 4 (см. рис. 1), содержащая эмиссионный канал, выполнена из магнитомягкого материала и представляет собой часть системы магнитопровода разрядной структуры, на которую замыкаются силовые линии слабого магнитного поля (в наших экспери-

ментах продольная составляющая магнитной индукции в области извлечения составляла 10 мТл, а поперечная извлечению составляющая не превышала 1 мТл). Вставка 3 (см. рис. 1) выполнена таким образом, что перекрывает практически всю площадь основной части эмиттерного электрода 4, за исключением эмиссионного канала. Причем материал вставки может быть как ферромагнитным (например, сталь), так и диамагнитным (например, медь). Во втором случае силовые линии магнитного поля замыкаются на основную часть эмиттерного электрода через вставку из немагнитного материала. В результате магнитное поле вне области эмиссионного канала ослабляется, что способствует более эффективному переключению тока с эмиттерного электрода в ток эмиссии, что иллюстрируется зависимостями тока эмиссии и эффективности извлечения от ускоряющего напряжения на рисунке 4 кривыми 1 и 4. Этот эффект может быть усилен – искусственным образом повысить потенциал вставки в эмиттерный электрод относительно плазмы. В этом случае потенциальный барьер, препятствующий уходу электронов из плазмы на эмиттерный электрод, возрастет, а ток эмиттерного электрода снизится. Наиболее эффективным в этом случае является использование вставки под плавающим потенциалом, который составляет величину порядка 50 В относительно анода, что в значительной степени ограничивает уход электронов из плазмы на эту часть эмиттерного электрода. При этом потенциал эмиттерного электрода в области эмиссионного канала остается анодным, что не ухудшает первоначальные условия эмиссии электронов из плазмы. Применение вставки с «плавающим» потенциалом целесообразно и в связи с тем, что практическая реализация такого потенциала осуществляется простой изоляцией вставки без применения дополнительных цепей в структуре электропитания генератора плазмы. Если при этом вставка выполнена из диамагнетика то, как видно из рисунка 4 (кривая 2), эмиссия осуществляется с наибольшей эффективностью, что позволяет формировать электронные пучки повышенной мощности.

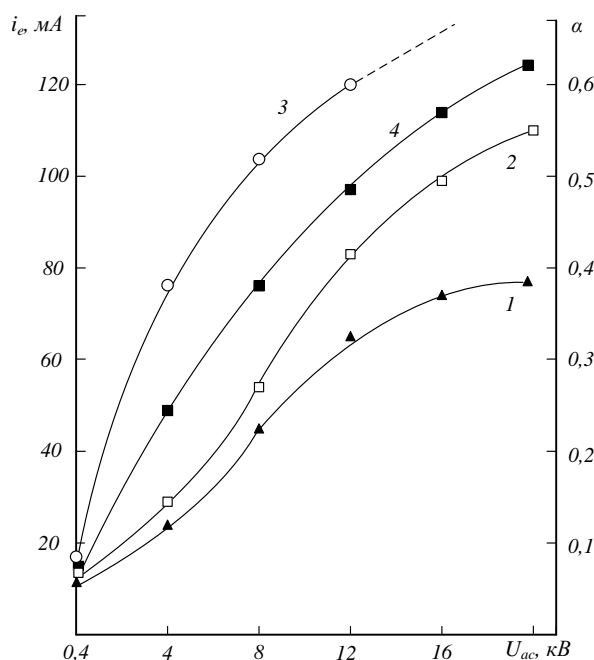


Рис. 4. Зависимость тока эмиссии и эффективности извлечения от ускоряющего напряжения при напуске плазмообразующего газа  $Q = 100 \text{ см}^3/\text{ч}$  и токе разряда  $i_d = 0,2 \text{ А}$ :

- 1 – вставка из ферромагнитного материала под анодным потенциалом; 2 – вставка из ферромагнитного материала под плавающим потенциалом; 3 – вставка из диамагнитного материала под плавающим потенциалом; 4 – вставка из диамагнитного материала под анодным потенциалом

**Заключение.** Экспериментальные результаты, изложенные в работе, показывают, что в дополнение к известному способу повышения эффективности извлечения электронов из плазмы за счет создания неоднородности распределения концентрации плазмы в разряде возможно использование и дополнительных способов, которые в ряде случаев могут оказаться более эффективными. Первый способ позволяет повысить эффективность извлечения за счет перераспределения токов между эмиттерным электродом и эмиссионным каналом, что может быть реализовано автосмещением потенциала анода разрядной камеры относительно плазмы. Согласно второму способу повышению эффективности извлечения способствует создание оптимальной конфигурации электрического и магнитного полей в плазме, при которых наиболее эффективно формируются потоки электронов из плазмы в область эмиссионного канала. Кон-

кретный способ управления эффективностью извлечения или некоторое сочетание способов целесообразно выбирать исходя из требований, предъявляемых к качеству электронного пучка и характеристикам плазменного эмиттера, обусловленных технологическими процессами электронно-лучевого воздействия.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Крейндель, Ю.Е. Плазменные источники электронов / Ю.Е. Крейндель. – М.: Атомиздат, 1977. – 145 с.
2. Источники заряженных частиц с плазменным эмиттером / П.М. Щанин [и др.]; под общ. ред. П.М. Щанина. – Екатеринбург: Наука, 1993. – 149 с.
3. Окс, Е.М. Источники электронов с плазменным катодом / Е.М. Окс. – Томск: Изд-во НТЛ, 2005. – 216 с.
4. Белюк, С.И. Промышленное применение электронных источников с плазменным эмиттером / С.И. Белюк, И.В. Осипов, Н.Г. Ремпе // Изв. вузов. Физика. – 2001. – Т. 44, № 9. – С. 77 – 84.
5. Метель, А.С. Расширение рабочего диапазона давлений тлеющего разряда с полым катодом / А.С. Метель // ЖТФ. – 1984. – Т. 54, вып. 2. – С. 241 – 247.
6. Распространение плазмы в эмиссионном канале анодного электрода плазменного источника электронов / Д.Г. Данилишин [и др.] // Изв. вузов. Физика. – 2001. – Т. 44, № 5. – С. 29 – 32.
7. Галанский, В.Л. О механизме переключения разрядного тока в эмиссионный канал ПИЭЛ / В.Л. Галанский, В.А. Груздев, В.В. Илюшенко // ЖТФ. – 1993. – Т. 63, вып. 4. – С. 58 – 67.
8. Источники заряженных частиц с плазменным эмиттером / П.М. Щанин [и др.]; под общ. ред. П.М. Щанина. – Екатеринбург: Наука, 1993. – 149 с.
9. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: справ. / Н.Н. Рыкалин [и др.]; под общ. ред. Н.Н. Рыкалина. – М.: Машиностроение, 1985. – 496 с.
10. Шипко, А.А. Упрочнение сталей и сплавов с использованием электронно-лучевого нагрева / А.А. Шипко, И.Л. Поболь, И.Г. Урбан. – Минск: Навука і тэхніка, 1995. – 280 с.
11. Zaleski, V.G. Peculiarities of plasma electron sources operation at high pressures / V.G. Zaleski, D.A. Antonovich // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2007. – № 40. – P. 7771 – 7777.
12. Universal plasma electron source / V.A. Gruzdev [et al] // Vacuum. – 2005. – № 77. – P. 399 – 405.
13. Антонович, Д.А. Эмиссионные свойства плазменного эмиттера электронов / Д.А. Антонович, В.А. Груздев, В.Г. Залесский // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С. Фундаментальные науки. – 2008. – № 9. – С. 114 – 123.

Поступила 02.03.2010

**WAYS OF INCREASE IN ELECTRON EXTRACTION EFFICIENCY  
IN SOURCES WITH THE PLASMA EMITTER**

**D. ANTONOVICH, V. GRUZDEV, V. ZALESSKI, I. RUSSETSKI**

*Some research results of an experimental ways of electron extraction efficiency increasing with preservation of discharge and emission current parameters stability, on an example of the plasma electron source with anode potential emitter electrode are presented. The offered ways are based on physical features of formation emitting plasma and emission current in plasma electron sources. In one of considered ways potential autodisplacement emitter electrodes of the plasma emitter discharge chamber is realized. That allows not only to raise efficiency of extraction, but also to provide autostabilization of emission current. Other way is defined by processes in plasma and based on redistribution of plasma parameters in the discharge chamber and formation of additional streams of plasma electrons in extraction area by changing of the electric and magnetic fields configuration without plasma emitter discharge chamber design changing.*