

ФИЗИКА

УДК 537.533; 621.384

ПЛАЗМЕННЫЙ ИСТОЧНИК ЭЛЕКТРОНОВ
С ИЗОЛИРОВАННЫМ ЭМИТТЕРНЫМ ЭЛЕКТРОДОМ

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

Представлены результаты экспериментального исследования основных характеристик плазменного источника электронов с изолированным эмиттерным электродом. Обнаружен ранее не исследованный режим формирования электронных пучков с помощью плазменных образований, который может рассматриваться как промежуточный между известными режимами работы газоразрядных структур, когда эмиссия электронов из плазмы осуществляется без ее возмущения отбором электронов либо когда эмиссия электронов реализуется в высоковольтном разряде с большим анодным падением потенциала. Показано, что в обнаруженном режиме достигается высокая эффективность извлечения электронов в сравнении с другими типами плазменных источников, что позволяет получать мощные электронные пучки высокой яркости.

Введение. К плазменным источникам электронов (ПИЭЛ) [1] относятся устройства, в которых с помощью низковольтного разряда, возбуждаемого в разрядной структуре, формируется плазма, эмиттирующая электроны через эмиссионный канал в одном из электродов разрядной камеры в ускоряющий промежуток, где формируется электронный пучок. Эмиссионный канал выполняется обычно в электроде, имеющем, как правило, анодный или катодный потенциалы.

В случае катодного потенциала эмиттерного электрода [1] разность потенциалов между плазмой и эмиттерным электродом составляет несколько сотен вольт и толщина слоя пространственного заряда, отделяющего плазму от эмиттерного электрода, сравнительно велика, что приводит к необходимости использовать эмиссионные каналы достаточно большого диаметра для достижения в плазменном источнике электронов приемлемой с технологической точки зрения эффективности извлечения электронов α (доли разрядного тока, отбираемого в электронный пучок). Однако поскольку давление плазмообразующего газа в разрядной камере обычно должно превышать допустимое давление в ускоряющем промежутке [1], при котором обеспечивается его электрическая прочность, а эмиссионный канал обеспечивает необходимый перепад давления между разрядной камерой и ускоряющим промежутком, увеличение его диаметра ограничено. Поэтому для большинства конструкций ПИЭЛ, которые нашли свое применение в промышленности [2] и научных целях [3], характерно относительно невысокая эффективность извлечения (не более 40 %). Кроме этого ионы плазмообразующего газа из плазмы поступают на стенки эмиссионного канала с высокой энергией (сотни эВ), что приводит к интенсивной эрозии канала и быстрому изменению его геометрических размеров, а это, соответственно, в значительной степени ограничивает ресурс эмиттерного электрода и источника в целом.

В случае анодного потенциала эмиттерного электрода толщина слоя пространственного заряда, отделяющего плазму от эмиттерного электрода, гораздо меньше. Однако в этом случае возникает проблема стабилизации эмиттирующей плазменной поверхности в эмиссионном канале, поскольку, чем больше плотность эмиттирующей плазмы, формируемой в разряде, тем выше вероятность ее проникновения через эмиссионный канал в ускоряющий промежуток и тем меньше допустимый диаметр канала, при котором реализуется необходимая стабильность тока эмиссии. Поэтому и в случае ПИЭЛ с анодным потенциалом эмиттерного электрода [4] значения эффективности извлечения примерно такие же.

Для этих типов ПИЭЛ увеличение тока электронного пучка I_e (мощности пучка P_e при постоянном ускоряющем напряжении U_a) при достигаемой эффективности извлечения возможно за счет повышения разрядного тока I_d . Однако при этом уменьшается эффективность извлечения электронов источника, пропорционально I_d возрастает интенсивность эрозии электродов разрядной камеры и эмиттерного электрода. Кроме этого, увеличение I_d ограничено возможностью перехода разряда, формирующего плазму, в дуговой режим, что приводит к нестабильностям горения разряда и эмиссии электронов из плазмы.

В данной работе представлены основные характеристики плазменного источника электронов с изолированным эмиттерным электродом, потенциал которого принимал промежуточное значение между катодным и анодным потенциалами. Это позволило использовать в определенной степени преимущества обоих типов ПИЭЛ и обеспечило возможность значительного увеличения эффективности извлечения электронов.

Техника эксперимента. Эксперименты проводились с плазменным источником электронов на основе разряда с полым катодом. На рисунке 1 показаны электродная структура источника, схема его электропитания и измерения параметров разряда и пучка.

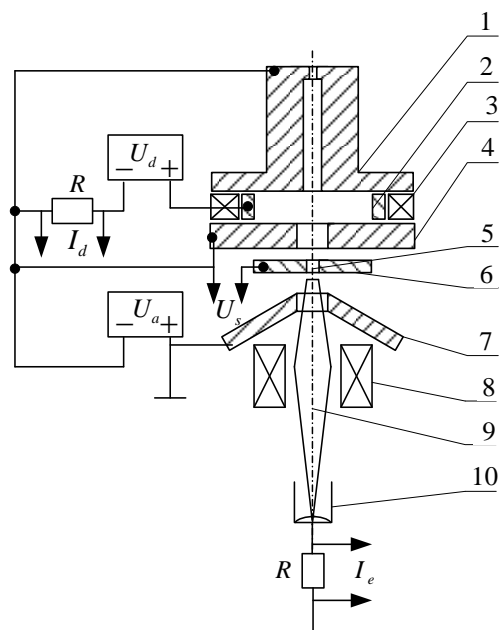


Рис. 1. Электродная структура плазменного источника электронов, системы электропитания и измерения:

- 1 – полый катод; 2 – анод; 3 – постоянные магниты; 4 – отражательный катод;
5 – эмиссионный канал; 6 – изолированный эмиттерный электрод; 7 – ускоряющий электрод;
8 – система фокусировки; 9 – электронный пучок; 10 – цилиндр Фарадея

Конструкция источника содержит дополнительный электрически изолированный электрод (эмиттерный электрод 6) с эмиссионным каналом 5, установленный между отражательным катодом 4 и ускоряющим электродом 7. Диаметр эмиссионного канала изменялся в условиях эксперимента от 1,2 до 2,3 мм. Постоянное ускоряющее напряжение U_a прикладывалось к ускоряющему промежутку между отражательным катодом 4 и ускоряющим электродом 7. Разрядное напряжение подавалось между катодами 1, 4 и анодом 2. Ток разряда измерялся с помощью осциллографа в катодной ветви электрической цепи. Электронный пучок принимался цилиндром Фарадея 10, а сигнал, пропорциональный току пучка I_e , снимался в цепи цилиндра с резистора R сопротивлением 1 Ом. Измерения показали, что токопрохождение в системе составляет порядка 95...98 %, что позволяет считать, что ток пучка равен току эмиссии. Разрядное напряжение и потенциал изолированного электрода U_s относительно катода измерялись с помощью осциллографа или вольтметра с большим внутренним сопротивлением (10 МОм). Изменение давления в системе производилось напуском плазмообразующего газа Q (в экспериментах – воздух) в разрядную камеру через отверстие в полый катод. Откачка газа разрядной камеры осуществлялась через эмиссионный канал, соединяющий разрядную камеру с вакуумной. Трехмерные фазовые изображения электронных пучков были исследованы с использованием диагностической аппаратуры и методики, описанной в [5].

Результаты экспериментов и их обсуждение. Вольтамперные характеристики разряда с изолированным эмиттерным электродом (рис. 2, кривые 1, 2) качественно соответствуют вольтамперным характеристикам разряда с эмиттерным электродом под катодным потенциалом (рис. 2 кривая 3) [1, 3]. Влияние дополнительного изолированного электрода проявляется в незначительном увеличении напряжения горения разряда (10...20 В), в параллельном смещении характеристик в область больших значений U_a , а также в повышении нижнего значения тока разряда, при котором существует эффект полого катода [6], с 50 мА – в случае катодного потенциала эмиттерного электрода, до 120 мА – в случае плавающего по-

тенциала изолированного эмиттерного электрода при прочих равных условиях. Последнее можно объяснить повышением интенсивности ухода с оси разряда замагниченных плазменных электронов на изолированный эмиттерный электрод, т.е. снижением плотности плазмы на оси разряда до возбуждения эффекта полого катода.

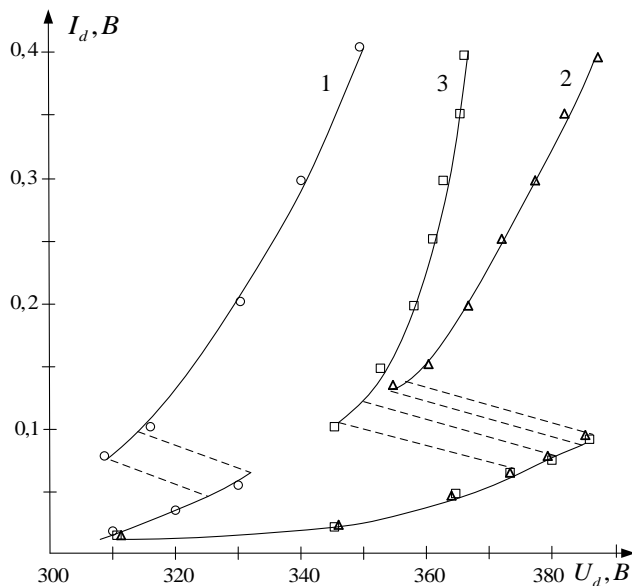


Рис. 2. Вольтамперные характеристики плазменного источника электронов в случае катодного (1) или плавающего потенциала эмиттерного электрода (2, 3):

$$1, 2 - Q = 0,8 \cdot 10^{-8} \text{ М}^3/\text{с} ; 3 - Q = 1 \cdot 10^{-8} \text{ М}^3/\text{с}$$

Очевидно, что при этом для возбуждения эффекта полого катода в разряде требуются большие ток разряда и напряжение горения. Этой же причиной можно объяснить смещение в область более высоких напряжений вольтамперных характеристик разряда с полым катодом при изолированном эмиттерном электроде в сравнении со случаем катодного потенциала эмиттерного электрода.

Из рисунка 3 видно, что при прочих равных условиях в ПИЭЛ с изолированным эмиттерным электродом (кривые 1 – 3) обеспечивается более высокая эффективность извлечения электронов из плазмы в сравнении с катодным потенциалом эмиттерного электрода (кривая 4). Для вольтамперных характеристик ПИЭЛ с изолированным эмиттерным электродом характерно наличие переходной области, в которой увеличение ускоряющего напряжения U_a при малом его изменении приводит к резкому увеличению тока эмиссии I_e . В этой области наблюдаются высокочастотные колебания тока пучка с амплитудой от минимального до максимального значения тока эмиссии. При дальнейшем увеличении ускоряющего напряжения эта модуляция (неустойчивость) тока эмиссии исчезает. Величина ускоряющего напряжения, при котором реализуется переходный процесс, зависит от давления газа в разрядной камере, что иллюстрируется смещением характеристик извлечения $\alpha(U_a)$ в область больших U_a с уменьшением напуска плазмообразующего газа. С ростом U_a выше некоторого значения эффективность извлечения α достигает квазинасыщения и далее слабо зависит от ускоряющего напряжения (рис. 3, а). При этом линейное увеличение тока эмиссии с ростом U_a обусловлено соответствующей зависимостью тока разряда от ускоряющего напряжения. Поэтому мощность пучка в этой области ускоряющих напряжений (рис. 3, б) также линейно изменяется с ростом U_a . В этом режиме линейный вид имеют и эмиссионные характеристики, полученные при изменении тока разряда изменением напряжения горения разряда (рис. 4, пунктирные линии 3 – 5).

Влияние на эти характеристики изменения ускоряющего напряжения показано на рисунке 4 (сплошные линии 1, 2). Эти зависимости свидетельствуют о переходе разряда, формирующего эмиттирующую плазму, при эмиссии электронов в новое состояние с возникновением положительной обратной связи между током эмиссии и током разряда, т.е. о влиянии процесса отбора электронов на режим горения разряда с эффектом полого катода.

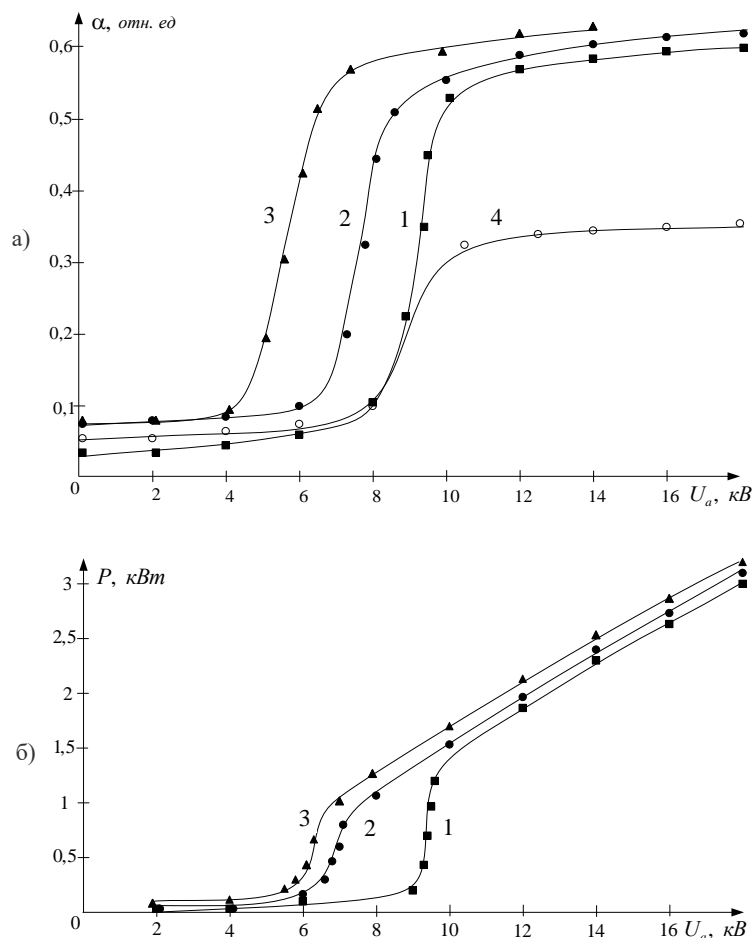


Рис. 3. Характеристики извлечения плазменного источника электронов в случае катодного (4) или плавающего потенциала эмиттерного электрода (1 – 3): а – эффективность извлечения; б – мощность электронного пучка (диаметр эмиссионного канала 2 мм); 1 – $Q = 0,5 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{с}$; 2 – $Q = 0,6 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{с}$; 3, 4 – $Q = 0,7 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{с}$

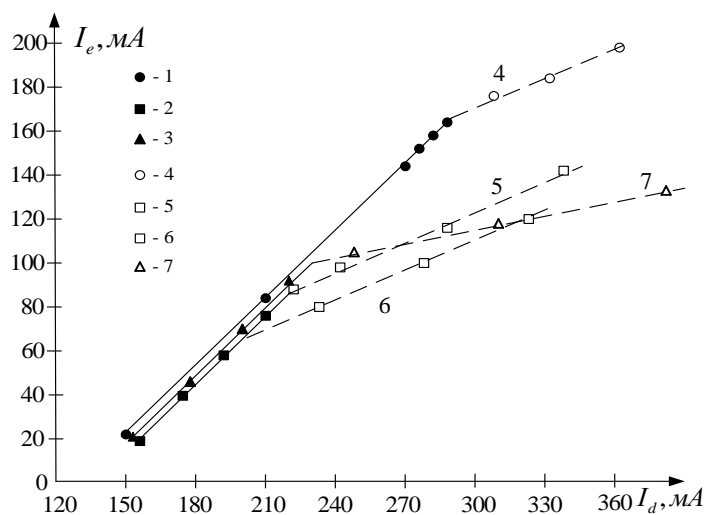


Рис. 4. Эмиссионные характеристики плазменного источника электронов в случае изменения ускоряющего напряжения (1 – 3) или напряжения горения разряда (4 – 7):

1 – 3 – $U_a = 380 \text{ В}$; 1, 3, 4, 7 – $Q = 0,8 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{с}$; 2, 5, 6 – $Q = 0,5 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{с}$;

4, 7 – $U_a = 10 \text{ кВ}$; 5 – $U_a = 14 \text{ кВ}$; 6 – $U_a = 12 \text{ кВ}$.

Диаметр эмиссионного канала: 1, 2, 4 – 6 – 2 мм; 3, 7 – 1,2 мм

Отличие крутизны эмиссионных характеристик, полученных при изменении тока разряда двумя способами, свидетельствует о различии механизмов формирования эмиссионного тока. Увеличение тока разряда может быть обусловлено повышением потенциала плазмы и/или ростом ионизационной способности плазменных электронов [1, 5].

Так, при постоянном напряжении горения разряда с ростом ускоряющего напряжения увеличивается ток разряда, ток эмиссии и эффективность извлечения, а ток анода снижается. По-видимому, это связано с перераспределением токов в разряде, вызванным интенсивным отбором электронов, и обусловлено формированием в плазме слабого электрического поля [7], способствующего возникновению дополнительного потока плазменных электронов в область эмиссионного канала из периферийной области катодов и повышению их ионизационной способности. С ростом напряжения горения разряда при постоянном ускоряющем напряжении увеличение тока разряда приводит к увеличению тока анода и менее эффективному, чем в первом случае, росту тока эмиссии. Это может означать, что в этом случае перераспределения токов в разряде не происходит, концентрация плазмы увеличивается во всем объеме за счет повышения ее потенциала и эффективность извлечения электронов из плазмы снижается.

Эти предположения о механизмах формирования эмиссионного тока иллюстрируется зависимостями потенциала изолированного эмиттерного электрода от тока разряда (рис. 5).

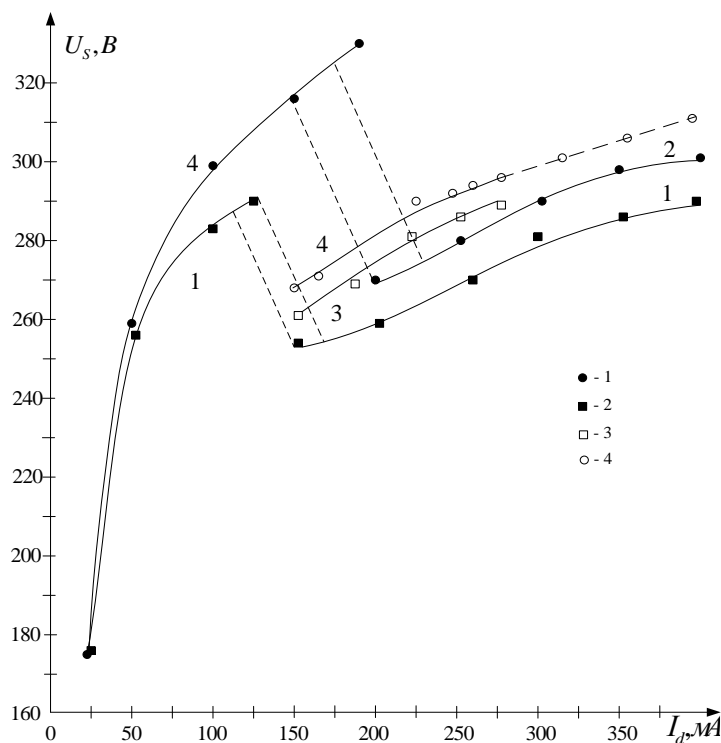


Рис. 5. Зависимость потенциала эмиттерного электрода от ускоряющего напряжения в отсутствие извлечения (1, 2) и при эмиссии электронов (3, 4) в случае изменения тока разряда изменением ускоряющего напряжения (сплошные линии 3, 4) или напряжения горения разряда (пунктирная линия, $U_a = 12$ кВ);

$$1, 3 - Q = 1,2 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{с}; \quad 2, 4 - Q = 0,8 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{с}$$

В отсутствие извлечения электронов на кривых 1, 2 (см. рис. 5) можно выделить две области.

Первая область соответствует режиму отражательного разряда с низкой плотностью, поэтому плазма не проникает через отверстие в отражательном катоду к эмиттерному электроду, и его потенциал определяется в основном потоком ионов из плазмы, т.е. оказывается близким к анодному потенциалу (разности потенциалов между катодом и анодом).

Вторая область соответствует режиму разряда с возбужденным эффектом полого катода. В этом случае плотность плазмы на оси резко возрастает, что приводит к проникновению ее в область эмиттерного электрода. В результате поток ионов на него компенсируется соответствующим потоком электронов из плазмы, и эмиттерный электрод приобретает потенциал существенно более низкий, чем анодный, и близ-

кий к «плавающему» потенциалу электрода, помещенного в плазму. Разность потенциалов между плазмой и изолированным электродом в этом случае увеличивается, что доказывает увеличение потока электронов из плазмы на изолированный эмиттерный электрод. В отсутствие извлечения электронов увеличение давления газа в разрядной камере (см. рис. 5, кривые 1, 2) приводит к увеличению разности потенциалов между плазмой и изолированным электродом вследствие увеличения потока электронов из плазмы при большей ее концентрации. Эмиссия электронов из плазмы, наоборот, вызывает уменьшение этой разности потенциалов, что свидетельствует о перераспределении токов в разряде и формировании потока электронов в эмиссионный канал.

Для оценки перспективности использования исследуемого плазменного источника электронов для получения сфокусированных электронных пучков на рисунке 6 для сравнения приведены фазовые портреты электронных пучков, формируемых ПИЭЛ с изолированным эмиттерным электродом и с катодным потенциалом эмиттерного электрода.

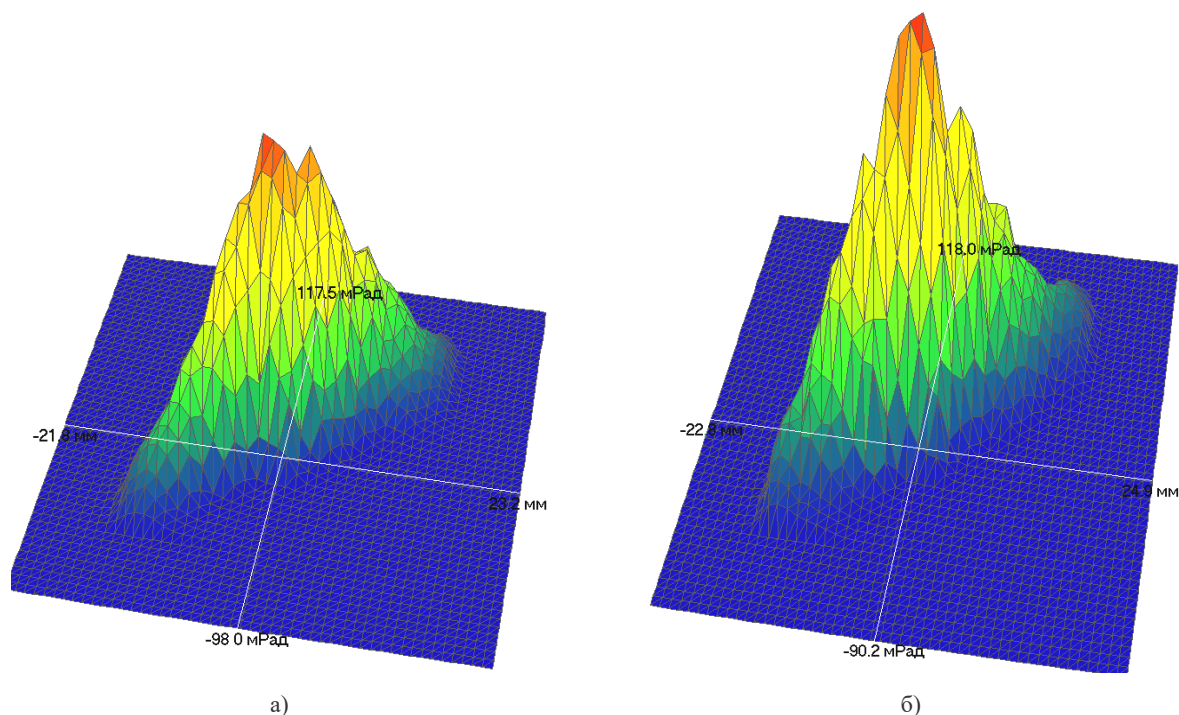


Рис. 6. Трехмерные фазовые портреты электронных пучков, полученных при прочих равных условиях ($U_a = 12$ кВ) в случае катодного потенциала эмиттерного электрода (а) и «плавающего» потенциала эмиттерного электрода (б):
 а – $I_e = 45$ мА, яркость – $8,1 \cdot 10^3$ А/(м рад)², эмиттанс – $2,51 \cdot 10^{-4}$ м рад, средняя расходимость – 0,066 рад;
 б – $I_e = 135$ мА, яркость – $2,1 \cdot 10^4$ А/(м рад)², эмиттанс – $2,45 \cdot 10^{-4}$ м рад, средняя расходимость – 0,064 рад

Поскольку ПИЭЛ с эмиттерным электродом под катодным потенциалом обеспечивают получение электронных пучков с высокой яркостью и достаточно эффективно применяются для сварки и родственных технологий [1, 2], например, наплавки, то из сравнения фазовых портретов следует, что разработанный ПИЭЛ с изолированным эмиттерным электродом также позволит формировать электронные пучки для этих технологий, но с существенно большей их мощностью и плотностью мощности.

Заключение. Использование в ПИЭЛ электрически изолированного эмиттерного электрода, значение потенциала которого устанавливается автоматически в соответствии с потоками зарядов на него как из эмиттирующей плазмы, так и из промежутка ускорения электронного пучка, позволило обнаружить ранее не исследованный режим формирования электронных пучков с помощью плазменных образований.

Такой режим эмиссии электронов представляется промежуточным между известными режимами работы газоразрядных структур:

- эмиссия электронов из плазмы без ее возмущения отбором электронов – реализуется в ПИЭЛ и является близким к режиму работы зонда в плазме;
- эмиссия электронов из плазмы высоковольтного разряда электронным пучком (ВРЭП) с большим анодным падением потенциала, когда параметры эмиттирующей плазмы полностью определяются параметрами электронного пучка.

Исследованные характеристики плазменного источника электронов с изолированным эмиттерным электродом показывают, что в этом режиме формирования электронного пучка сохраняется возможность применения физических и схмотехнических принципов стабилизации тока пучка, разработанных для технологических ПИЭЛ и обеспечивается высокая яркость и плотность мощности электронного пучка, как в ПИЭЛ. В то же время может быть реализовано значительное повышение мощности электронного пучка до значений, реализуемых в газоразрядных структурах на основе ВРЭП.

Эти особенности исследуемого режима работы ПИЭЛ делают актуальной и перспективной его теоретическую разработку с целью создания эффективных технологических электронно-лучевых устройств с применением изолированного эмиттерного электрода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Плазменные процессы в технологических электронных пушках / М.А. Завьялов [и др.]; под общ. ред. Ю.Е. Крейндыля. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 212 с.
2. 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.
3. Окс, Е.М. Источники электронов с плазменным катодом / Е.М. Окс. – Томск: Изд-во НТЛ, 2005. – 216 с.
4. Плазменный источник электронов: пат. № 7573 Респ. Беларусь, МПК 7 Н 01J 37/077, 3/00 / В.А. Груздев, В.Г. Залесский // Афіцыйны бюл. / Нац. центр інтэлектуал. уласнасці. – 2005. – № 4(47). – Ч. 1. – С. 240.
5. Способ и устройство для диагностики электронно-оптических систем плазменных источников электронов / В.А. Груздев [и др.]. – Минск: Докл. БГУИР. – 2009. – № 1(39). – С. 71 – 77.
6. Москалев, Б.И. Разряд с полым катодом / Б.И. Москалев. – М.: Энергия, 1969. – 184 с.
7. Груздев, В.А. Формирование эмиссионного тока в плазменных эмиттерах электронов / В.А. Груздев, В.Г. Залесский // Прикладная физика. – 2009. – № 5. – С. 87 – 92.

Поступила 01.09.2010

PLASMA ELECTRON SOURCE WITH ISOLATED EMISSION ELECTRODE

V. GRUZDEV, V. ZALESSKIY, I. RUSECKIY

Results of an experimental research of the plasma emitter source basic characteristics with isolated emission electrode are presented. Not investigated mode of electron beams formation by means of plasma formations is found out. Such mode is intermediate between known operating modes of gas-discharge structures when electron emission from plasma is carried out without its indignation by electron selection or when electron emission is realised in the high-voltage discharge with the big anode potential drop. It is shown, that in the found out mode high efficiency of electron extraction in comparison with other types of plasma sources that allows to receive powerful electron beams with high brightness is reached.