

УДК 537.533; 621.384

ПЛАЗМЕННЫЙ ЭЛЕКТРОННО-ИОННЫЙ ИСТОЧНИК

*д-р техн. наук, проф. В.А. ГРУЗДЕВ,
канд. физ.-мат. наук, доц. В.Г. ЗАЛЕССКИЙ, П.Н. СОЛДАТЕНКО
(Полоцкий государственный университет)*

Представлены результаты экспериментального исследования эмиссионных характеристик плазменного электронно-ионного источника с расширителем плазмы под различными потенциалами. Показано, что в разработанном источнике при изменении полярности извлекающего напряжения и без изменения конструкции могут быть получены низкоэнергетичные электронные и ионные пучки с параметрами, достаточными для реализации ряда корпускулярно-лучевых технологий – модификации свойств поверхностей при переменном-периодическом воздействии на них ионного и электронного пучков в едином технологическом цикле.

Введение. Поскольку плазменные источники заряженных частиц при изменении полярности ускоряющего напряжения способны обеспечить эмиссию как электронов, так и ионов, существует принципиальная возможность комбинированного ионно-электронного воздействия на поверхность материала с использованием одного источника. Возможность создания таких устройств отмечали некоторые исследователи [1], однако практические конструкции до настоящего момента не созданы.

Принципы формирования электронных пучков (в основном сфокусированных) в высоковольтных плазменных источниках электронов (ПИЭЛ) с ускоряющим напряжением более 10^4 кВ для электронно-лучевой сварки и других применений к настоящему времени в значительной степени разработаны [2 – 4]. Наибольший интерес для практического применения представляют ПИЭЛ, формирующие пучки большого сечения (ПБС) с использованием электрода-расширителя, в котором эмитирующая плазменная поверхность [5 – 7] создается в расширителе за счет ионизаций газа в нем и диффузии плазмы в него из основного разряда. Однако недостаточно изучены особенности формирования электронных пучков, в том числе и ПБС, при достаточно низких (1...5 кВ) ускоряющих напряжениях. Такие устройства представляются перспективными для расширения применения электронно-лучевых технологий: пайка (распайка) изделий, покрытие поверхностей плавящимися на них материалами и других без применения специальных мер рентгеновской защиты.

В данной работе представлены некоторые результаты экспериментальных исследований эмиссионных характеристик плазменного источника, показывающие возможность получения низкоэнергетичных электронных и ионных пучков без изменения конструкции источника с параметрами пучков, достаточными для технологического применения, в частности азотирования, совмещенного с электронным нагревом поверхности до технологически необходимой температуры.

Техника эксперимента. Экспериментальная конструкция электродной структуры разработанного источника, который позволяет формировать как электронные, так и ионные пучки без внесения изменений в конструкцию структуры, представлена на рисунке 1. Для снижения степени влияния потенциала электрода-расширителя на условия формирования плазмы и горения разряда предусмотрена возможность модификации газоразрядной структуры за счет использования дополнительного электрода, расположенного между внешним катодом и расширителем, как показано на рисунке 1. Потенциал дополнительного электрода мог как соответствовать анодному (являться частью анода), так и иметь промежуточный потенциал.

Область, где осуществляется основная ионизация газа, ограничена внешним 1 и внутренним 2 катодами и анодом 3. Между катодами 1 и 2 с помощью постоянных магнитов 6 формируется магнитное поле с вектором индукции, перпендикулярным рабочим поверхностям катодов. Вследствие этого подвижность электронов из плазмы на анод 3 ограничена, что способствует повышению степени ионизации газа и повышению плотности плазмы в области основного разряда. Из межкатодного пространства плазма проникает в расширитель 8, в котором формируется эмитирующая плазменная поверхность. Положение этой поверхности может стабилизироваться сеточным электродом или устанавливаться без сеточного электрода в соответствии с условием равенства газокINETического и электростатического давлений для ионов и электронов [4]. Плазмообразующий газ напускается в разрядную структуру через канал в штуцере 5 и катоде 1. При помощи базового фланца 10 разрядная структура соединяется с вакуумной камерой, где реализуется технологический процесс электронного и ионного взаимодействия с поверхностью материала.

Для выявления оптимальных условий формирования электронных и ионных пучков проводились исследования параметров разряда и плазмы при различных длинах электрода-расширителя (12, 18, 21,

23 и 26 мм) и при различных его потенциалах (анодный, катодный, промежуточный между катодным и анодным потенциалами).

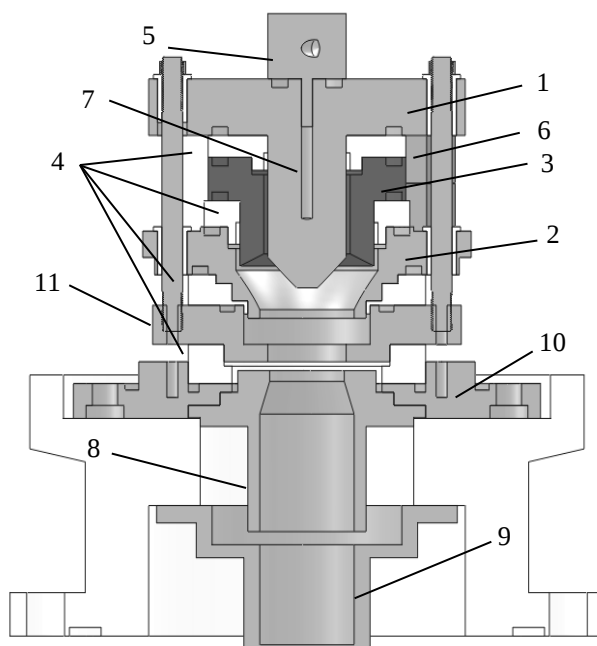


Рис. 1. Внешний вид разрядной структуры с дополнительным электродом и расширителем:

- 1 – внешний катод; 2 – внутренний катод; 3 – анод; 4 – изоляторы;
- 5 – штуцер для напуска плазмообразующего газа; 6 – постоянные магниты;
- 7 – отверстие для напуска газа; 8 – расширитель плазмы;
- 9 – ускоряющий электрод; 10 – фланец; 11 – дополнительный электрод

Промежуточное значение потенциала (ниже анодного примерно на 150 В) достигалось за счет использования сопротивления смещения в цепи соответствующего электрода или в случае изоляции этого электрода от системы электропитания источника. Концентрация плазмы определялась зондовым методом по ионному току насыщения. При исследовании вольт-амперной характеристики (ВАХ) разряда в торце расширителя устанавливался электрод (в других экспериментах используемый как коллектор) с катодным потенциалом, что обусловлено необходимостью создать оптимальные условия для обеспечения высокой эффективности эмиссии ионов. Ток эмиссии электронов и ионов определялся как ток на поверхности коллектора, имитирующей обрабатываемую поверхность и установленного под торцом электрода-расширителя. Ускоряющее напряжение на коллектор подавалось относительно катодов разрядной камеры. Измерение тока в цепи коллектора осуществлялось с использованием цифрового осциллографа типа Bordo-424 измерением падения напряжения на сопротивлении 1 Ом, через которое коллектор заземлялся вместе с технологической камерой.

Результаты экспериментов и их обсуждение. Исследование вольтамперных характеристик разряда показало, что изменение потенциала электрода-расширителя не приводит к изменению вида ВАХ, а отличие заключается в смещении ВАХ по шкале напряжений горения в диапазоне от 300 до 400 В. Влияние потенциала электрода-расширителя и его длины на напряжение горения разряда при постоянном токе разряда проиллюстрировано на рисунке 2. Видно, что с увеличением длины расширителя напряжение горения растет, причем более существенный рост наблюдается в случае анодного (кривая 2) или промежуточного (кривая 3) потенциала в сравнении с катодным потенциалом. Повышение напряжения горения с увеличением длины расширителя при постоянном токе разряда может быть обусловлено недостаточной развитостью ионизационных процессов в расширителе, что приводит к превалированию ухода частиц над генерацией в случае увеличения площади боковой поверхности электрода-расширителя. В случае катодного потенциала (кривая 1) с увеличением длины расширителя (h) в большей степени проявляется эффект полого электрода в сравнении с анодным потенциалом (кривая 2), что следует из сравнений крутизны зависимостей на рисунке 2 при больших h .

На рисунке 2 также представлены зависимости, полученные в условиях отрицательного относительно катода потенциала коллектора (4 кВ), т.е. в условиях эмиссии ионов из плазмы в отсутствие сечного электрода в торце расширителя. Видно, что эмиссия ионов не оказывает существенного влияния

на процессы в расширителе при анодном потенциале (кривые 2, 5), проявляется в снижении крутизны в случае промежуточного потенциала (кривые 3, 6) и уменьшении напряжения горения в случае его катодного потенциала (кривые 1, 2). Эти зависимости свидетельствуют о существовании механизмов возмущения плазмы отбором ионов, как и в случае эмиссии электронов.

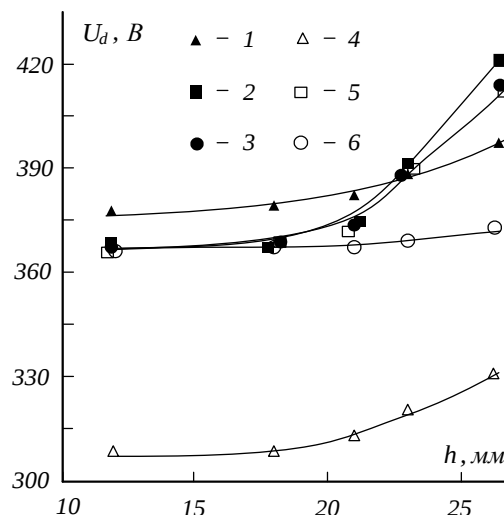


Рис. 2. Зависимость напряжения горения разряда при постоянном токе разряда 300 мА от длины электрода-расширителя при различных его потенциалах.
Потенциал электрода-расширителя: 1, 4 – катодный; 2, 5 – анодный; 3, 6 – промежуточный.
Ускоряющее напряжение: 1, 2, 3 – 0 кВ; 4, 5, 6 – 4 кВ

Установлено, что дополнительный электрод (см. рис. 1) не вносит существенных изменений в качественный вид ВАХ разряда. Эксперименты показали, что более высокая эффективность извлечения и стабильность эмиссионного тока электронов достигаются в следующих вариантах: I – анодный потенциал имеет электрод-расширитель и дополнительный электрод; II – электрод-расширитель имеет анодный потенциал, а дополнительный электрод – промежуточный потенциал.

С изменением длины электрода-расширителя параметры формируемой плазмы (концентрация) в области эмиссии изменяются, как показано на рисунке 3. С ростом длины расширителя растет объем плазмы, но и увеличивается площадь ухода заряженных частиц. Поэтому когда электрод-расширитель находится под катодным потенциалом, электроны на его стенки не уходят и эффективность ионизационных процессов в расширителе выше, а значит, концентрация (рис. 3, кривые 3, 4) и плотность ионного тока в этом случае также выше в сравнении со случаем его анодного потенциала (кривые 1, 2).

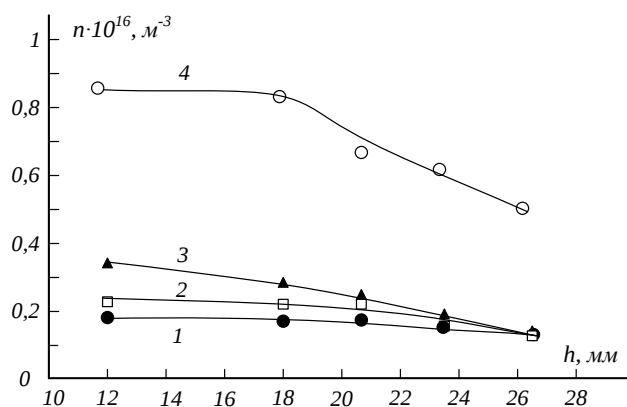


Рис. 3. Зависимость распределения концентрации плазмы от длины электрода-расширителя при различных его потенциалах.
Ток разряда: 1, 2 – 300 мА; 3, 4 – 150 мА.
Потенциал электрода-расширителя: 1, 2 – анодный, 3, 4 – катодный

Характеристики извлечения электронов из разряда с электродом-расширителем под анодным, катодным или промежуточным потенциалом представлены на рисунке 4.

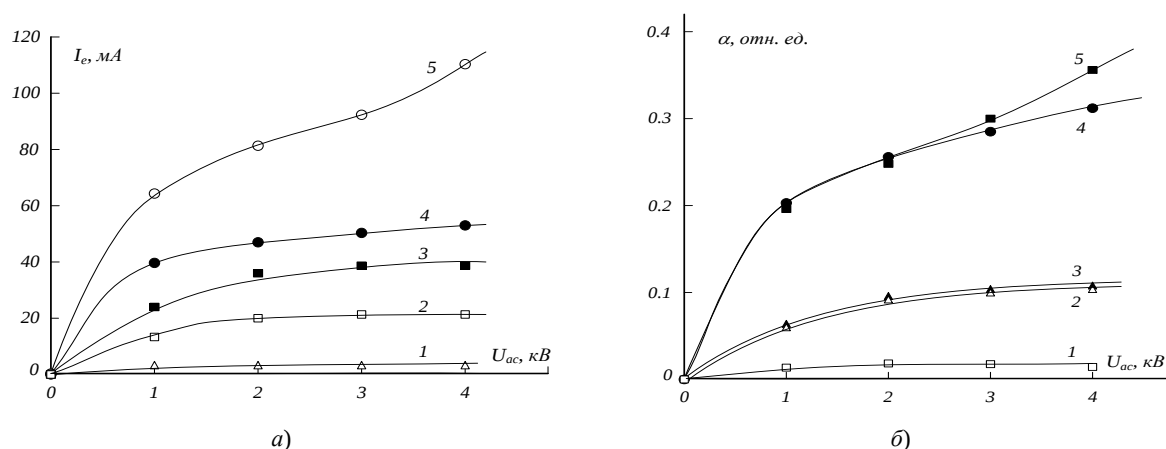


Рис. 4. Характеристики извлечения электронов при различных потенциалах электрода-расширителя:

a – ток эмиссии; b – эффективность извлечения.

Ток разряда: 2, 4 – 200 мА; 1, 3, 5 – 350 мА.

Потенциал электрода-расширителя: 1 – катодный;
2, 3 – анодный; 4, 5 – промежуточный

На величину эмиссионного тока оказывают влияние как минимум два фактора: концентрация плазмы в расширителе, которая формируется за счет диффузии из основного разряда и ионизационных процессов в нем, и электрическая прозрачность сеточного электрода, стабилизирующего эмитирующую плазменную поверхность.

Из представленных характеристик видно, что наибольшая эффективность извлечения электронов наблюдается в случае промежуточного потенциала электрода-расширителя (рис. 4, a , кривые 4, 5). Это обусловлено, вероятно, большей электрической проницаемостью апертуры электрода-расширителя для проникновения плазмы из основного разряда, ограничением ухода электронов на стенки расширителя с более отрицательным относительно плазмы потенциалом и, соответственно, более высокой эффективностью ионизационных процессов в объеме этого электрода. При этом, как видно из рисунка 4, b (кривые 4, 5), величина тока разряда не влияет на эффективность извлечения, т.е. доля отбираемых из плазмы электронов остается постоянной, что свидетельствует о независимости эффективности извлечения электронов (рис. 4 кривые 2, 3 и 4, 5) от концентрации плазмы в данной системе. Использование дополнительного электрода не позволяет достичь высоких значений тока эмиссии в сравнении со структурой без дополнительного электрода. Однако эмиссия электронов в этом случае отличается большей стабильностью и меньшей зависимостью тока разряда от тока эмиссии, о чем свидетельствует наличие области насыщения для более широкого спектра условий, в отличие от структур без дополнительного электрода (рис. 4, a , кривая 5), где данное явление не наблюдается.

Необходимо отметить, что извлечение электронов в системе без сеточного электрода возможно только в узком диапазоне рабочих параметров (напуск газа, ускоряющее напряжение).

Представленные характеристики получены с использованием сеточного электрода, что приводит к снижению эффективности извлечения, но значительно расширяет диапазон рабочих параметров стабильной работы источника электронов. Это свидетельствует о целесообразности поиска дополнительных механизмов стабилизации плазменной границы в системах без сеточного электрода, например, за счет использования магнитного поля.

Экспериментальные характеристики извлечения ионов в представленной структуре показаны на рисунке 5 в условиях бессеточного электрода в торце расширителя. Эксперименты подтвердили, что вследствие изменения параметров формируемой плазмы (см. рис. 3) ток ионной эмиссии также уменьшается с увеличением длины расширителя. При этом эффективность извлечения ионов максимальна в случае катодного потенциала (рис. 5, b , кривые 3, 4) в сравнении со случаем анодного потенциала расширителя (рис. 5, b , кривые 1, 2) и стремится к насыщению.

Эксперименты показали, что зависимости тока электронной и ионной эмиссии от тока разряда имеют близкий к линейному вид, что обеспечивает возможность эффективного управления током пучка

изменением тока разряда. На рисунке 5, *а* представлен пример такой зависимости тока ионного пучка от тока разряда; на рисунке 5, *б* показана зависимость эффективности извлечения ионов, полученная в тех же условиях. Снижение эффективности извлечения ионов с ростом тока разряда может быть обусловлено перераспределением тока разряда в пользу катодов основной газоразрядной структуры.

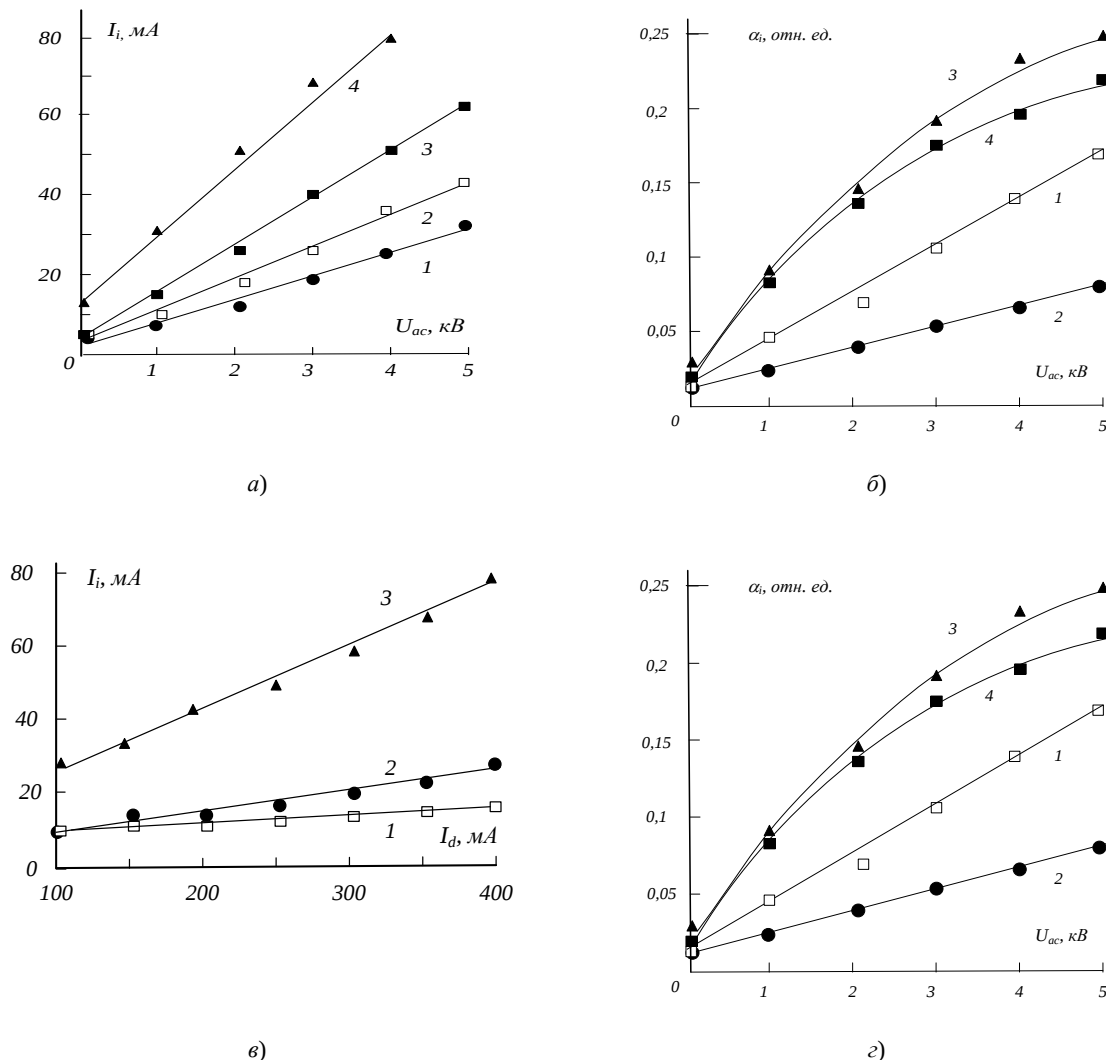


Рис. 5. Характеристики извлечения (*а, б*) и эмиссионные характеристики (*в, г*) источника ионов с электродом-расширителем длиной 12 мм без сеточного электрода в торце.

а, в – ток ионной эмиссии; *б, г* – эффективность извлечения ионов;

а, б – потенциал электрода-расширителя: 1, 2 – анодный, 3, 4 – катодный; ток разряда: 1, 3 – 150 мА, 2, 4 – 300 мА;

в, г – потенциал электрода-расширителя: 1 – анодный, 2 – промежуточный, 3 – катодный; ускоряющее напряжение 4 кВ

Как уже отмечалось, одним из наиболее важных факторов, способных обеспечить стабильность эмитирующей плазменной поверхности, но оказывающих существенное влияние на эффективность извлечения электронов, является магнитное поле в области расширителя, которое может быть создано системой магнитов или возникает в нем за счет проникновения магнитного поля в апертуру расширителя из области основного разряда. Вследствие различия в тепловых энергиях электронов и ионов в плазме сначала замagnetиваются электроны, а затем, с ростом индукции магнитного поля, ионы.

На рисунке 6 представлены зависимости относительной эффективности извлечения ионов (кривая 1) и электронов (кривая 2) от величины индукции магнитного поля, в сравнении с минимальным значением эффективности, характерным для максимального значения индукции магнитного поля в условиях анодного потенциала электрода-расширителя.

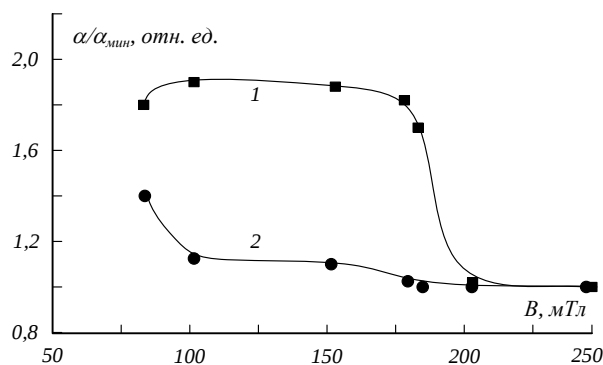


Рис. 6. Зависимость относительной эффективности извлечения ионов (1) и электронов (2) от индукции магнитного поля: ток разряда – 300 мА; ускоряющее напряжение – 5 кВ

Из рисунка 6 видно, что существует такой диапазон интенсивности магнитного поля, в котором эффективность извлечения ионов и электронов слабо зависит от индукции магнитного поля.

Заключение. Эксперименты подтвердили возможность создания универсального плазменного источника электронных и ионных пучков в стационарном режиме. Для обеспечения требуемых значений и соотношений плотностей ионного и электронного токов эмиссии возможна оптимизация конструкции за счет применения дополнительного электрода и подбора таких комбинаций потенциала электродов, при которых эффективность извлечения электронов и ионов будет достаточно высокой. Для повышения токов эмиссии и сокращения технологического времени воздействия их на материалы можно использовать импульсные режимы горения разряда. Это, как показали предварительные эксперименты, может обеспечить увеличение плотности тока эмиссии до 10 раз.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мамаев, А.С. Разработка ионно-плазменных методов нанесения покрытий и азотирования перспективных конструкционных материалов: дис. ... канд. техн. наук / А.С. Мамаев. – Екатеринбург, 2012.
2. Источники заряженных частиц с плазменным эмиттером / П.М. Щанин [и др.]; под общ. ред. П.М. Щанина. – Екатеринбург: Наука, 1993. – 149 с.
3. Источники электронов с плазменным эмиттером / Ю.Е. Крейндель [и др.]; под общ. ред. Ю.Е. Крейнделя. – Новосибирск: Наука, 1983. – 120 с.
4. Разработка и применение источников интенсивных электронных пучков: сб. науч. тр. / науч. ред. Г.А. Месяц. – Новосибирск: Наука, 1976. – 191 с.
5. Бугаев, С.П. Электронные пучки большого сечения / С.П. Бугаев, Ю.Е. Крейндель, П.М. Щанин. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 112 с.
6. Плазменный эмиттер электронов с сеточной стабилизацией. Ч. I / А.В. Жаринов [и др.] // ЖТФ. – 1986. – Т. 56, вып. 1. – С. 66 – 70.
7. Плазменный эмиттер электронов с сеточной стабилизацией. Ч. II / А.В. Жаринов [и др.] // ЖТФ. – 1986. – Т. 56, вып. 4. – С. 687 – 693.

Поступила 05.02.2013

PLASMA ELECTRON AND IONIC SOURCE

V. GRUZDEV, V. ZALESSKI, P. SOLDATENKO

The results of experimental study of emission characteristics of a plasma electron and ionic source with plasma expander at different potentials are shown. It is shown that in the developed source with the change of polarity of extracting voltage and without construction changing can be obtained low-energy electrons and ion beams with parameters sufficient for realization of a number of particle-beam technologies – modification of the properties of surfaces with variable periodic exposed to the ion and electron beams in a single technological cycle can be obtained.