

УДК 537.533; 621.384

**ЭЛЕКТРОННО-ИОННЫЙ ИСТОЧНИК ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ  
КОМБИНИРОВАННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПОВЕРХНОСТЬ**

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

*Демонстрируется разработанная конструкция электродной структуры с системой ее электропитания, позволяющая осуществлять попеременное извлечение электронов и ионов из плазмы газового разряда и реализовывать комбинированное ионно-электронное воздействие на поверхность материала пучками низкоэнергетических заряженных частиц. Представлены полученные экспериментальные характеристики разработанных структур. Результаты проведенного исследования свидетельствуют о возможности применения подобных структур для реализации ряда технологий модификации поверхностей.*

**Введение.** Ионно-плазменные технологии являются перспективными для управляемой модификации свойств поверхностей материалов (металлов) с целью их упрочнения, повышения коррозионной стойкости, аморфизации, изменения электрофизических свойств, формирования на поверхностях композитных покрытий [1–3]. При этом для модификации механических и коррозионных свойств поверхностей применяются ионные (плазменные) потоки с энергией ионов обычно ниже 1 кэВ и плотностью потока порядка 1 мА/см<sup>2</sup>. Известно, что эффективность ионного воздействия зависит от температуры модифицируемого материала. При этом ее поддержание во всем изделии не целесообразно не только с точки зрения энергосбережения, но и для исключения короблений и других термических дефектов готового изделия. Известно также, что электронные пучки с плотностью мощности до 10<sup>8</sup> Вт/м<sup>2</sup> кроме термического могут оказывать и модифицирующее (упрочняющее) воздействие.

В качестве источника ионных пучков наиболее перспективными представляются газоразрядные структуры, формирующие эмиттирующую плазму с площадью поверхности, соответствующей площади обрабатываемой поверхности изделия. Принципиальная особенность таких структур – возможность эмиссии из формируемой плазмы частиц обоих знаков при изменении полярности ускоряющего напряжения. Значит, существует принципиальная возможность отдельного электронного или ионного, а также комбинированного ионно-электронного воздействия на поверхность материала с использованием одного источника. В случае низкоэнергетичного воздействия требуемый уровень можно обеспечить за счет сопровождения ионной модификации поверхности нагревом электронным пучком, обеспечивающим теплофизическое воздействие на поверхность. В этих условиях эффективность использования энергии будет максимальна, поскольку теплоотдача будет осуществляться только в приповерхностной области, вследствие этого интенсивность воздействия может быть невелика. Поэтому представляется целесообразным использовать плазменные источники, формирующие электронные и ионные пучки, позволяющие обеспечить комбинированное воздействие: термическое и модифицирующее электронное и модифицирующее ионное.

Ранее [4] была предложена конструкция источника, которая обеспечивает формирование низкоэнергетичных электронных пучков в стационарном режиме с параметрами, достаточными для реализации ряда технологий модификации поверхностей. Однако задача повышения мощности воздействия остаётся актуальной. С этой целью целесообразно применение импульсных режимов функционирования.

В данной работе представлены некоторые результаты экспериментального исследования возможности реализации комбинированного ионно-электронного воздействия на поверхность материала с использованием одного источника.

**Конструкция электродной структуры разработанного источника.** На рисунке 1 представлена одна из разработанных нами конструкций электродной структуры экспериментального источника. Для формирования плазмы используется модифицированный отражательный разряд. Область, где осуществляется основная ионизация газа, ограничена катодами 2 и 3 и анодом 4. Между катодами 2 и 3 с помощью постоянных магнитов 7 формируется магнитное поле с вектором индукции, перпендикулярным рабочим поверхностям катодов. Вследствие этого подвижность электронов из плазмы на анод 4 ограничена, что способствует повышению степени ионизации газа и повышению плотности плазмы в области основной ионизации. Величина магнитного поля также влияет на эффективность извлечения электронов или ионов из плазмы. Через верхнее отверстие плазма проникает в расширитель 9, в котором раз-

мещается изделие 1, установленное на блоке перемещения изделия. Плазмообразующий газ в разрядную структуру напускается через канал в штуцере 6 и катод 2. Конструкция газоразрядной структуры предусматривает расположение обрабатываемых изделий и механизма их подачи в расширитель плазмы 9 внутри вакуумной камеры, которая соединяется с разрядной структурой с помощью базового фланца 10.

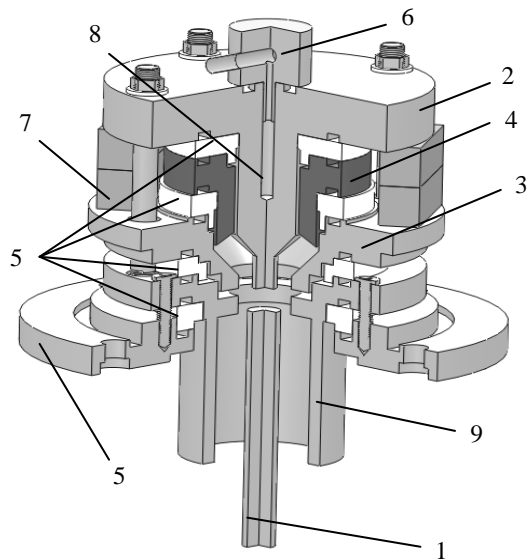


Рис. 1. Внешний вид разрядной структуры с расширителем и скрещенными полями:

- 1 – изделие; 2, 3 – катоды; 4 – анод; 5 – изоляторы;  
6 – штуцер для напуска плазмообразующего газа;  
7 – магниты; 8 – отверстие для напуска газа;  
9 – расширитель плазмы; 10 – фланец

При подаче соответствующей разности потенциалов между изделием 1 и расширителем 9 на изделие из плазмы может обеспечиваться поток ионов с энергией от 20 эВ и выше, а также электронный поток с соответствующей энергией, которым обеспечивается подогрев обрабатываемой поверхности изделия. При этом изделие может размещаться как в расширителе (см. рис. 1), так и в отдельном ускоряющем электроде, потенциал которого может обеспечить дополнительное переключение электронного или ионного потока из плазмы в пучок. Необходимо отметить, что эта конструкция газоразрядной структуры при необходимости может быть изменена к варианту, при котором размещение изделий и механизма их перемещения осуществляется вне вакуумной камеры. Для анализа импульсных характеристик использовался цифровой осциллограф типа BORDO 432.

#### Результаты экспериментов и их обсуждение.

Рассмотрены три варианта формирования импульсных ионных пучков. Первый состоял в следующем: на электроды разрядной структуры предварительно подавалось сравнение импульсного режима с режимом постоянного

разряда при одинаковом напряжении питания разряда показало, что в импульсном режиме ток разряда возрастает в 2–3 раза, а длительность импульса при этом составляет величину порядка  $10^{-2}$  с.

Проведенные эксперименты свидетельствуют о том, что эффективность извлечения в рассматриваемых трех случаях формирования импульсного воздействия примерно одинаковая и близкая по значению стационарному режиму.

На основе полученных осциллограмм проводились расчёты суммарного заряда  $q$ , флюенса  $\Phi$  и полной энергии  $E$ , вкладываемой в изделие за один импульс, в соответствии со следующими соотношениями:

$$q = \int_0^{\tau_{имп}} I_i(t) dt; \quad E = \int_0^{\tau_{имп}} I_i^2(t) R dt; \quad \Phi = \frac{q}{eS},$$

где  $I_i(t)$  – импульс тока ионной эмиссии;  $\tau_{имп}$  – длительность импульса;  $S$  – площадь ионного воздействия;  $R$  – сопротивление в цепи измерения тока эмиссии (в экспериментах составляло 1 Ом).

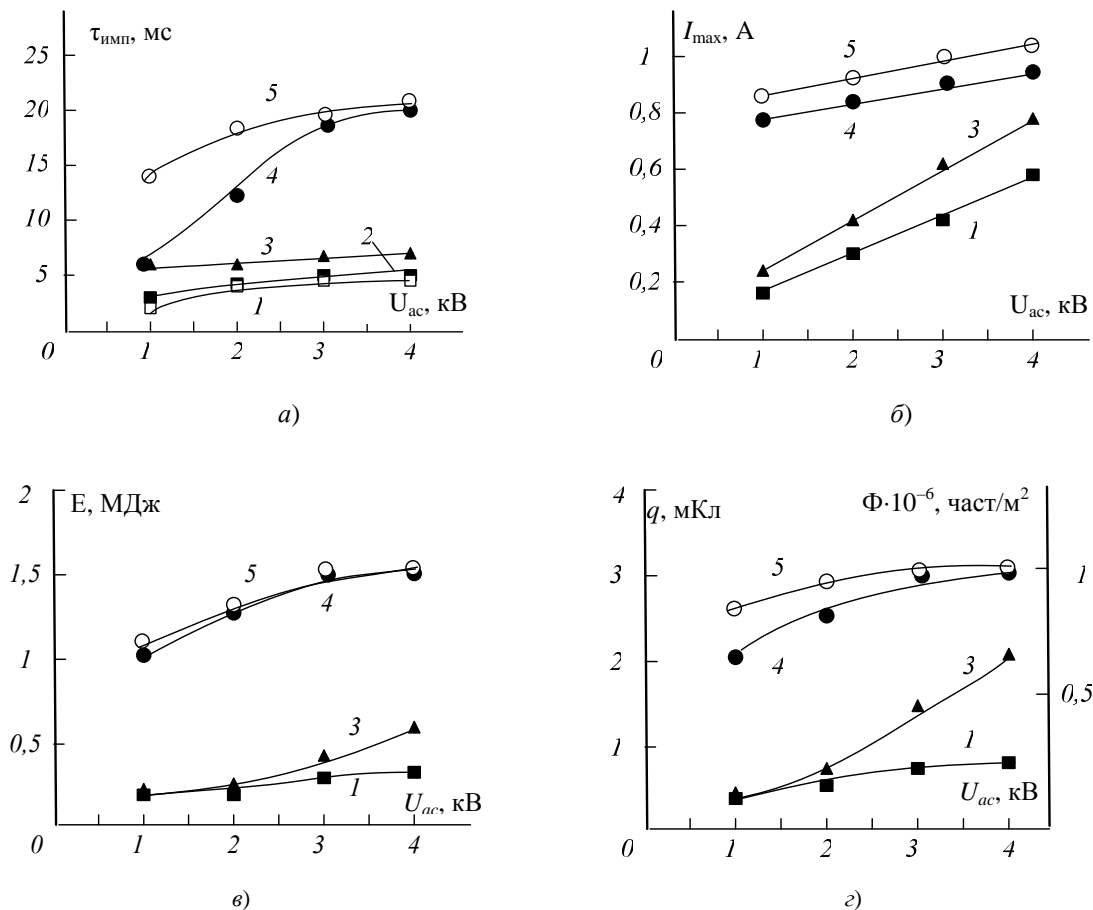
Зависимости расчетных величин отображены на рисунке 2. Анализ представленных зависимостей показал, что длительность импульса (рис. 2, а) в незначительной степени зависит от тока разряда (кривые 1–3) и определяется в основном давлением газа в газоразрядной структуре (кривые 1, 4, 5).

Амплитудное значение тока эмиссии (рис. 2, б) обусловлено концентрацией формируемой плазмы, зависящей от тока разряда и давления газа. Причем большая крутизна зависимостей максимального тока эмиссии от ускоряющего напряжения при меньшем давлении (кривые 1, 3) связана с большей подвижностью ионов при меньшем давлении и, соответственно, более существенной реакцией плазмы и разряда на отбор ионов в сравнении со случаем большего давления (кривые 4, 5). При этом энергия импульса ионного тока также определяется давлением газа.

Эффективность использования энергии (рис. 2, в) импульса ускоряющего напряжения (величина которой определяется емкостью системы электропитания и в условиях эксперимента составляла 4 мкФ) оказывается выше в случае больших давлений, а сама эффективность использования этой энергии падает с ростом ускоряющего напряжения.

На рисунке 2, г показаны зависимости заряда и флюенса (суммарного потока) на поверхность (площадь порядка  $10^{-4}$  м<sup>2</sup>) изделия за один импульс. Для достижения заданного уровня воздействия в

данном режиме необходимо или повышать плотность плазмы за счет увеличения давления газа, или увеличивать число импульсов воздействия (формировать более 10). В общем случае суммарное время воздействия будет не более десятка секунд, что позволяет считать перспективным разработку такого типа устройств для формирования ионных потоков на поверхность малогабаритных изделий. Увеличение же давления снижает электрическую прочность ускоряющего промежутка, особенно в режиме эмиссии электронов, поэтому этот подход в сравнении с вариантом импульсного воздействия суммарной заданной длительности, достигаемой за счет требуемого числа импульсов, менее перспективен для формирования комбинированного воздействия.



ток разряда: 1, 4, 5 – 200 мА; 2 – 250 мА; 3 – 350 мА;  
 давление газа: 1, 2, 3 – 1 Па; 4 – 10 Па; 5 – 30 Па; потенциал электрода-расширителя анодный

Рис. 2. Зависимость параметров ионного воздействия за один импульс от ускоряющего напряжения:  
 а – длительность импульса; б – максимальный ток; в – энергия; г – заряд и флюенс

Выбор оптимальных режимов термического электронно-лучевого воздействия сопровождался анализом требуемых параметров электронно-лучевого воздействия с использованием разработанной прикладной программы [5] на основе решения уравнения теплопроводности с учётом температурной зависимости коэффициента теплопроводности для материалов типа сталь 45. В расчётах геометрия изделия предполагалась цилиндрической с диаметром, превышающим диаметр электронного воздействия. В качестве критерия останковки расчета при заданных плотности мощности электронного пучка и параметрах непрерывного или импульсного воздействия использовалось условие достижения температуры 600 °С на глубине материала 0,5 мм, что, как предполагалось, достаточно для создания упрочненного слоя при ионном воздействии. Мощность варьировалась током пучка и площадью воздействия при ускоряющем напряжении 5 кВ. При заданной плотности мощности определялись общее время воздействия, длительность и скважность импульсов. Некоторые результаты расчетов приведены на рисунках 3, 4.

На рисунке 3 представлена зависимость общего времени воздействия при различных плотностях мощности. При указанных плотностях мощности общее время воздействия не превышало десяти секунд, что позволяет предполагать возможность эффективного комбинированного воздействия. Для исключения распыления поверхности вследствие ее перегрева и повышения однородности прогрева модифици-

руемого слоя целесообразно использовать импульсный режим воздействия, при котором варьируется как длительность импульса, так и время паузы (скважность воздействия). На рисунке 4, а отображены результаты расчетов по влиянию длительности воздействия одного импульса на общее время воздействия, а на рисунке 4, б – результаты расчетов по влиянию длительности паузы на общее время воздействия при различных плотностях мощности.

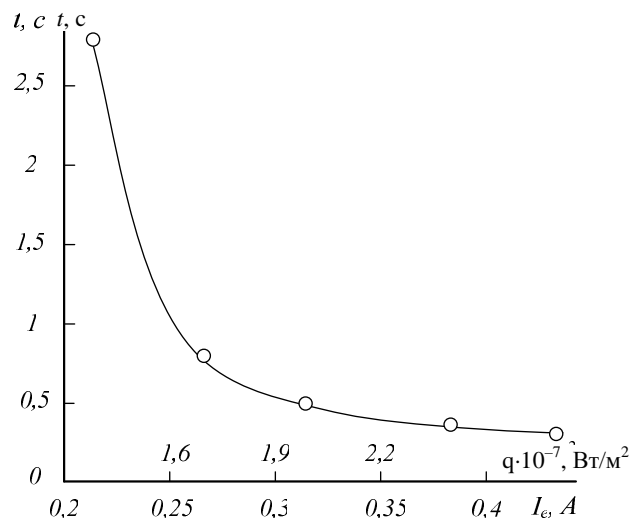
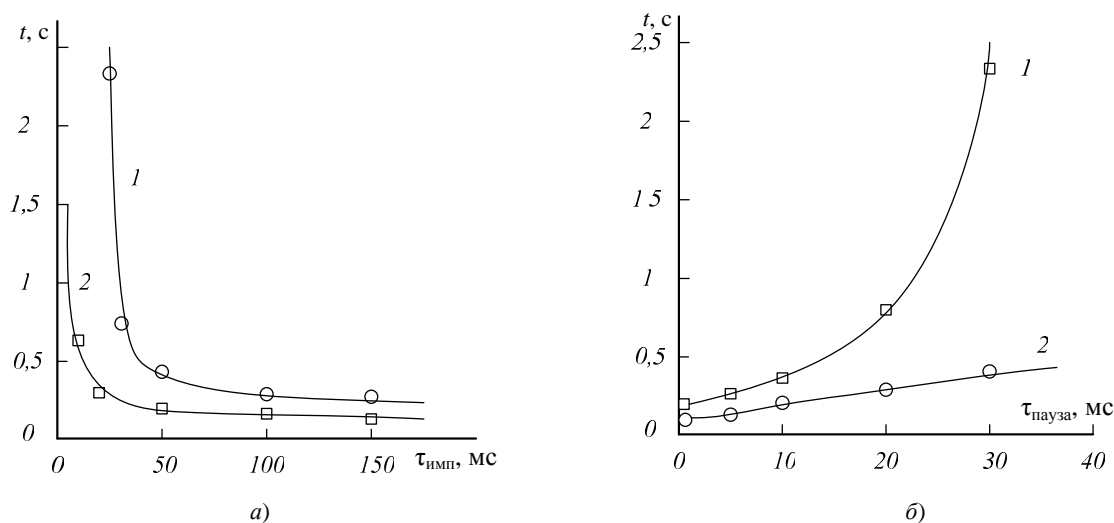


Рис. 3. Зависимость общего времени воздействия от плотности мощности электронно-лучевого воздействия, необходимого для достижения требуемой температуры ( $600\text{ }^\circ\text{C}$ ) на заданной глубине ( $0,5\text{ мм}$ ) при площади воздействия  $1,2 \cdot 10^{-4}\text{ м}^2$



площадь воздействия –  $1,2 \cdot 10^{-4}\text{ м}^2$ ; длительность паузы –  $20\text{ мс}$ ; плотность мощности:  
1 –  $1,6 \cdot 10^7\text{ Вт/м}^2$ ; 2 –  $2,55 \cdot 10^7\text{ Вт/м}^2$

Рис. 4. Зависимость общего времени воздействия, необходимого для достижения требуемой температуры ( $600\text{ }^\circ\text{C}$ ) на заданной глубине ( $0,5\text{ мм}$ ), от длительности импульса (а) и от длительности паузы между импульсами (б)

На основании проведенных расчетов могут быть определены диапазоны параметров импульсов, необходимые для достижения требуемой температуры на заданной глубине. Так, для отображенных на рисунках расчетов оптимальными можно считать следующее: при требуемой плотности мощности более  $2 \cdot 10^7\text{ Вт/м}^2$  (ускоряющее напряжение  $5\text{ кВ}$ , ток пучка  $0,3\text{ А}$ ) длительность импульса должна составлять величину порядка  $50\text{ мс}$  при длительности паузы  $20\text{ мс}$ . Эти условия необходимы для выбора параметров системы импульсного электропитания. Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о возможности формирования разряда и ускорения заряженных частиц от одного источника: с переменной полярностью для попеременного извлечения электронов и ионов из плазмы газового разряда и формирования разряда напряжением постоянной полярности.

**Система электропитания разработанной конструкции.** Для реализации импульсного воздействия применялась искусственная формирующая длинная линия, для автоматической дозации количества импульсов при импульсном режиме работы газоразрядных структур возможна к применению система управления электропитанием, представляющая собой электронный ключ в цепи постоянного электропитания разрядной структуры со схемой его управления [6]. Однако применение такой системы для реализации комбинированного режима работы источника затруднено, поскольку формирование комбинированных электронных и ионных потоков с требуемыми параметрами в одном источнике требует обеспечения эффективного механизма перехода от одного режим к другому. Это, с одной стороны, предполагает исключение значительных емкостей в системе электропитания, с другой – требует разработки систем коммутации для смены полярности высоковольтного питания, что усложнит схему электропитания и снизит ее надежность. В свою очередь результаты, полученные при исследовании параметров импульсных ионных и электронных пучков, и анализ их теплофизических характеристик позволили сделать вывод о возможности предельного упрощения системы электропитания.

Так, на рисунке 5 показаны осциллограммы, иллюстрирующие формирование разряда в периодическом режиме, при его электропитании от однопериодного выпрямителя.

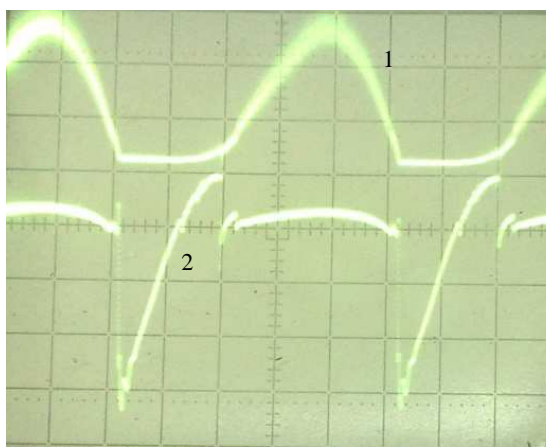


Рис. 5. Осциллограммы тока разряда (1 – 0,1 А/дел) и напряжения горения разряда (2 – 100 В/дел), временная длительность 2 мс/дел

На осциллограмме видны момент зажигания разряда при достижении соответствующего напряжения, область стационарного горения разряда и момент его гашения при падении напряжения ниже некоторого значения. Длительность существования разряда в каждом из полупериодов импульсов с частотой 50 Гц определяется давлением газа и амплитудным значением напряжения на разряде и удовлетворительно совпадает с необходимой длительностью импульсов тока разряда, полученной при теплофизическом анализе.

Для реализации указанных режимов использовалась схема, отображенная на рисунке 6.

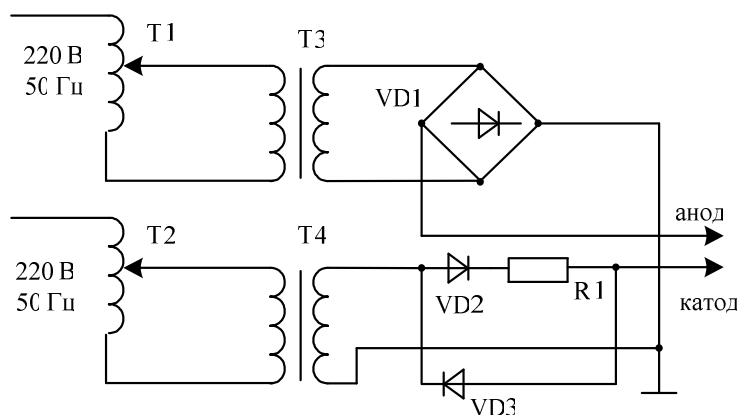


Рис. 6. Схема электропитания разрядной структуры для реализации комбинированного воздействия

Представленная схема отличается простотой и высокой надёжностью. Балластное сопротивление R1 обеспечивает возможность реализации комбинированного питания с управляемой амплитудой ускоряющего напряжения, различной для формирования ионного и электронного пучков, что необходимо для реализации ряда технологий.

**Заключение.** Полученные результаты свидетельствуют о возможности попеременного извлечения электронов и ионов из плазмы газового разряда и реализации комбинированного ионно-электронного воздействия на поверхность материала с использованием одного источника заряженных частиц с параметрами, достаточными для реализации ряда технологий модификации поверхностей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Источники заряженных частиц с плазменным эмиттером / П.М. Щанин [и др.]; под общ. ред. П.М. Щанина. – Екатеринбург: Наука, 1993. – 149 с.
3. Мамаев, А.С. Разработка ионно-плазменных методов нанесения покрытий и азотирования перспективных конструкционных материалов: дис. ... канд. техн. наук / А.С. Мамаев. – Екатеринбург, 2012.
4. Груздев, В.А. Плазменный ионно-электронный источник / В.А. Груздев, В.Г. Залесский, П.Н. Солдатенко // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия С. Фундаментальные науки. – 2013. – № 4. – С. 63–68.
5. Груздев, В.А. Моделирование температурного поля в поверхностном слое при импульсном электронно-лучевом воздействии / В.А. Груздев, В.Г. Залесский, Д.Г. Руголь // Инженерно физический журнал. – 2007. – № 2. – С. 134 – 142
6. Блок питания разряда плазменного источника электронов / Д.А. Антонович [и др.] // Приборы и техника эксперимента. – 2006. – № 5. – С. 130–132.

Поступила 05.03.2014

#### **ELEKTRON AND ION SOURCE FOR REALIZATION THE COMBINED INFLUENCE ON THE SURFACE**

**D. ATONOVICH, V. GRUZDEV, V. ZALESSKI**

*The developed design of electrode structure with system of its power supplies is presented, allowing to carry out alternate extraction electrons and ions from gas discharge plasma and to realise the combined influence on a surface of a material bunches low energetic the charged particles are ions and electrons. The received experimental characteristics of the developed structures are presented. The received results testify to possibility of application of similar structures for realisation of some technologies of updating of surfaces.*