#### УДК 621.38:533.9

## Ю.Г. Юшков, Е.М. Окс, А.В. Медовник, В.А. Бурдовицин

# Распределение плотности тока по сечению импульсного электронного пучка в форвакууме

Представлены результаты исследования распределения плотности тока по сечению пучка, также приведены принципиальная конструкция и основные параметры плазменного источника электронов, предназначенного для формирования импульсного широкоапертурного электронного пучка в форвакуумном диапазоне давлений (5÷20 Па).

**Ключевые слова:** плазменный источник электронов, тлеющий разряд, полый катод, форвакуумная область давлений, эмиссия электронов из плазмы.

Облучение материалов импульсным электронным пучком является эффективным способом модификации поверхности. До недавнего времени такое облучение было возможно для проводящих материалов, преимущественно металлов [1, 2]. Создание форвакуумного источника с плазменным катодом [3] дало возможность реализовать электронно-лучевую модификацию непроводящих материалов, в частности керамики. Одна из основных проблем генерации электронных пучков большого сечения состоит в обеспечении однородности пучка по его сечению. Описанный в [3] пучок такой

однородностью не обладал. Цель настоящей работы состояла в выяснении причин неоднородности пучка, а также в поиске путей снижения этой неоднородности.

**Техника эксперимента.** Экспериментальный макет форвакуумного плазменного источника импульсного пучка электронов представлен на рис. 1.

Рис. 1. Импульсный источник электронов: *I* – полый катод; *2* – катодная вставка; *3* – изолятор; *4* – анодый фланец; *5* – анодная сетка; *6* – изолятор ускоряющего промежутка; *7* – экстрактор



Выполненный из меди катод 1 содержит цилиндрическую полость  $\emptyset$  93 и высотой 70 мм. На оси полости установлена катодная вставка 2 диаметром 19 мм. Сеточный анод 5 выполнен в виде сетки из нержавеющей стали, размер ячейки сетки каждой из которых 0,6×0,6 мм, а геометрическая прозрачность 70%. Сеточный анод 5 закреплен на фланце 4. Собранный узел полого катода установлен на изоляторе 6.

Плоскопараллельный ускоряющий промежуток образован двумя сетчатыми электродами: анодом 5 и экстрактором 7. Расстояние между этими электродами во всех экспериментах оставалось неизменным и составляло 25 мм. Сетка экстрактора 7 (2,5×2,5 мм, 70%) также изготовлена из нержавеющей стали. Изоляторы 3 и 6 разрядного и высоковольтного промежутков выполнены из капролона. Диаметр и высота изоляторов равны соответственно 100 и 70 мм для разрядного и 146 и 40 мм для ускоряющего промежутков. Распределения плотности тока снимались по диаметру пучка.

Источник электронов размещался на вакуумной камере, откачиваемой механическим насосом до предельного давления 1 Па. Рабочее давление (5÷20 Па) регулировалось подачей газа (аргона или воздуха) непосредственно в вакуумную камеру.

Результаты работы и их анализ. Результаты измерений плотности тока пучка представлены на рис. 2. Как видно, распределения плотности тока имеют весьма неравномерный характер. Для выяснения причин этой неоднородности было определено радиальное распределение концентрации эмиссионной плазмы путем измерения ионного тока на зонд, размещаемый в непосредственной близости к эмиссионному электроду. Полученная кривая (рис. 3) имеет форму, близкую к симметричной, и отличается от кривой, представленной на рис. 2. Таким образом, неоднородность эмиссионного тока обусловлена не неоднородностью плазмы, но иными причинами. Одна из таких причин заключается в неплоской форме эмиссионного электрода. Это приводит к нарушению однородности ускоряющего поля и, как следствие, к неоднородности эмиссии. Для улучшения плоскостности эмиссионной сетки была модернизирована конструкция анодного узла.



В первом варианте анодный электрод представлял собой два плоских кольца, выполненных из нержавеющей стали, между которыми зажималась сетка, такая система не могла обеспечить равномерное натяжение анодной сетки. Для устранения данной проблемы был создан новый анодный



Рис. 4. Система натяжения анодной сетки

узел (рис. 4). Принцип конструкции заключается в том, что на одном из колец, между которыми зажимается сетка, выполнен паз, а на втором кольце (ответной его части) имеется выступ. Таким образом, при сжатии колец сетка натягивается, при этом качество натяжения сетки гораздо лучше, чем в первой конструкции.

После изменения системы натяжения эксперименты были проведены повторно и показали улучшение равномерности распределения плотности тока по сечению пучка. Однако в центре пучка плотность тока оказалась заметно меньшей, чем на периферии пучка (рис. 5), причем распределение плотности тока по форме соответствует распределению плотности эмиссионной плазмы (рис. 3).



Доклады ТУСУРа, № 2 (24), часть 2, декабрь 2011

Для улучшения однородности плазмы была проведена серия экспериментов, в которых исследовалась зависимость распределения плотности тока от длины катодной вставки 2 (рис. 1). Изменение L от нуля до максимального значения, соответствующего высоте катодной полости, вызывало изменение формы распределения плотности тока от колоколообразной до двугорбой с плотностью тока в центре, близкой к нулю. Оптимальная длина этой вставки оказалась равной 65 мм. Соответствующее распределение плотности тока представлено на рис. 6.

Заключение. Проведенные эксперименты дают основания указать две основные причины неоднородности электронного пучка по его сечению. Первая связана с неоднородностью эмиссии электронов вследствие нарушения плоскопараллельности ускоряющего промежутка. Эта причина устраняется натяжением эмиссионной сетки. Вторая причина состоит в неоднородности самой эмиссионной плазмы, которая обусловлена особенностями разряда с полым катодом, содержащим цилиндрическую вставку. Оптимизация размеров этой вставки позволила устранить радиальную неоднородность эмиссионной плазмы и обеспечить в сечении пучка диаметром 40 мм неоднородность, не превышающую 10% при плотности тока 0,6 А/см<sup>2</sup>.

Работа поддержана РФФИ (проект № 10-08-00257) и Минобрнауки (проект № 2.1.2/1951).

#### Литература

1. Proskurovsky D.I. Use of low-energy, high-current electron beams for surface treatment of materials / D.I. Proskurovsky, V.P. Rotstein, G.E. Ozur // Surface & Coatings Technology. – 1997. – Vol. 96, № 1. – P. 117–122.

2. Surface treatment of WC-Co dies with low energy high current electron beam irradiation preparation / S.V. Grigoryev, N.N. Koval, K.V. Shalnov, K. Uemura // Proc. Of 8<sup>th</sup> Conf. on Modif. of Materials (Tomsk, Russia). – 2006. – P. 255–257.

3. Электронно-лучевая обработка керамики / А.В. Медовник, В.А. Бурдовицин, А.С. Климов, Е.М. Окс // Физика и химия обработки материалов. – 2010. – № 3. – С. 39–44.

### Юшков Юрий Георгиевич

Аспирант, м.н.с. каф. физики ТУСУРа Тел: 8-953-913-7575 Эл. почта: YuYushkov@sibmail.com

#### Окс Ефим Михайлович

Д-р. техн. наук, профессор, зав. каф. физики ТУСУРа Тел.: 41-33-69 Эл. почта: oks@fet.tusur.ru

Медовник Александр Васильевич Мл. науч. сотрудник каф. физики ТУСУРа Тел: 8-913-802-94-86

Эл. почта: medovnikav@mail.ru

# Бурдовицин Виктор Алексеевич

Д-р. техн. наук, профессор каф. физики ТУСУРа Тел.: 41-33-69 Эл. почта: burdov@fet.tusur.ru

### Yushkov Yu.G., Oks E.M., Medovnik A.V., Burdovitsin V.A. Distribution of current density on the cross section of electron beam in forevacuum

There are given the results of the investigation on the current density distribution in the beam, and basic design and basic parameters of the plasma electron source designed to generate a pulsed electron beam in wide-backing pressures ( $5\div 20$  Pa).

**Keywords:** plasma electron source, glow discharge, hollow cathode, backing pressure range, emission of electrons from plasma.