

УДК 537.533

А.А. Зенин, А.С. Климов, А.Н. Николаенко

## Повышение эффективности извлечения электронов из полого катода форвакуумного плазменного электронного источника

Представлены результаты экспериментов, направленных на повышение эффективности эмиссии из полого катода в плазменном источнике электронов, работающем в непрерывном режиме в диапазоне давлений 10–30 Па. Показано, что изменение геометрии разрядного промежутка, а именно изменение внутреннего диаметра и формы полого катода, приводит к повышению концентрации плазмы в области отбора электронов из плазмы, а следовательно, и к возрастанию эффективности эмиссии из полого катода.

**Ключевые слова:** форвакуум, плазма, пучки электронов, эмиссия электронов из плазмы.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2017-20-2-40-42

Получение острогофокусированных пучков электронов является одной из важнейших задач при проектировании и изготовлении источников электронов. Миллиметровые и субмиллиметровые пучки традиционно получают в высоком вакууме с использованием термокатодов [1]. Такие пучки электронов применимы в основном для обработки проводящих материалов и изделий. Переход к форвакуумному диапазону давлений в единицы и десятки паскаль позволяет производить электронно-лучевую обработку как проводящих материалов, так и диэлектриков без применения дополнительных средств нейтрализации заряда, накапливаемого на поверхности облучаемой детали [2].

Применение острогофокусированных субмиллиметровых пучков электронов как инструмента для обработки высокотемпературной керамики является перспективным направлением развития плазменных источников электронов, а повышение эффективности работы таких источников является первостепенной задачей. Как показали эксперименты, проведенные ранее [3] для получения острогофокусированных субмиллиметровых пучков электронов в форвакуумных плазменных источниках, эмиссия электронов должна идти из одиночного отверстия, при этом для достижения заданной величины тока пучка требуется либо увеличение плотности плазмы в разрядном промежутке, либо увеличение диаметра эмиссионного отверстия. Последнее, наряду с ростом тока, приводит к увеличению диаметра пучка, а при превышении некоторого порогового значения и к «вываливанию» плазмы из разрядного промежутка, что в итоге влечет за собой закорачивание ускоряющего промежутка [4]. С другой стороны, уменьшение диаметра эмиссионного отверстия приводит к уменьшению диаметра пучка, а также к значительному снижению величины максимального тока. Основной задачей работы является поиск способа повышения тока пучка при сохранении минимального диаметра пучка.

### Методика проведения эксперимента

Эксперименты проводились с применением плазменного источника электронов (рис. 1) на основе тлеющего разряда с полым катодом, способным

функционировать в форвакуумном диапазоне давлений (1–100 Па). Разрядная система для генерации эмиссионной плазмы состоит из цилиндрического полого катода 1 и плоского анода 2 с эмиссионным окном, перекрытым тонким (~1 мм) танталовым перфорированным электродом 3. Ускоряющий промежуток образован анодом 2 и ускоряющим электродом 4.

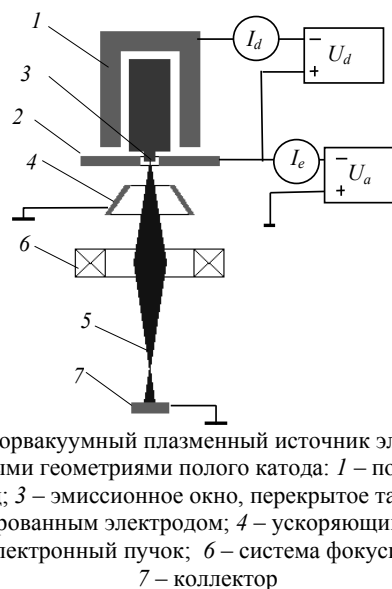


Рис. 1. Форвакуумный плазменный источник электронов с различными геометриями полого катода: 1 – полый катод; 2 – анод; 3 – эмиссионное окно, перекрытое танталовым перфорированным электродом; 4 – ускоряющий электрод; 5 – электронный пучок; 6 – система фокусировки; 7 – коллектор

Электропитание разрядного и ускоряющего промежутков осуществляется двумя независимыми источниками питания и имеет следующие параметры: ускоряющее напряжение до 20 кВ, ток разряда до 600 мА. Ускорение и формирование электронного потока в пучок производится в промежутке анод–экстрактор. Затем электронный пучок попадает в магнитное поле фокусирующей системы, где он окончательно формируется. Эффективность извлечения электронов из плазмы оценивалась по величине тока пучка, регистрируемого на коллекторе. В экспериментах использовались три различные геометрии полого катода – это исходная геометрия (рис. 2, а) и две модернизированные геометрии (рис. 2, б, в).

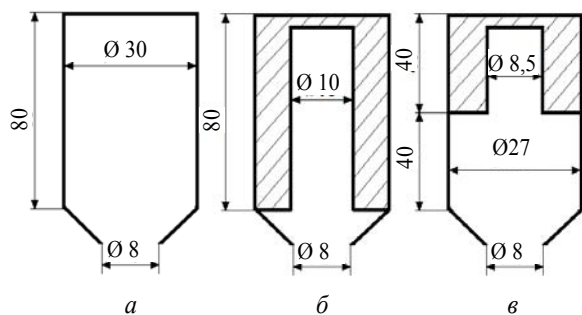


Рис. 2. Геометрии полого катода: а – исходная геометрия; б, в – модернизированные геометрии

Модернизация геометрии разрядного промежутка осуществлялась путем установки в полый катод дополнительных вставок, позволяющих изменять внутренний диаметр и форму полого катода. Вставки были выполнены из немагнитной нержавеющей стали и при установке имели хороший тепловой контакт с водяной рубашкой охлаждения полого катода, что позволяло снизить нагрев применяемых вставок. В представленных экспериментах эмиссионное окно, перекрытое перфорированным электродом 3 (см. рис. 1), имело одно отверстие по центру диаметром 0,75 мм, через которое и происходила эмиссия электронов.

Для измерения концентрации плазмы в разрядном промежутке использовался одиночный Ленгмюровский зонд, установленный в отверстие перфорированного электрода. Схема эксперимента приведена на рис. 3.

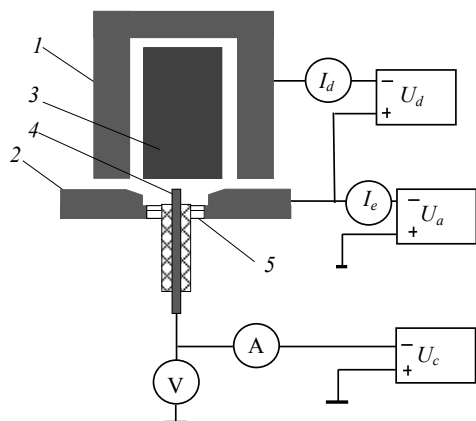


Рис. 3. Схема измерения концентрации плазмы в разрядном промежутке катод–анод: 1 – полый катод; 2 – анод; 3 – перфорированный электрод; 4 – одиночный Ленгмюровский зонд; 5 – плазма тлеющего разряда

Зонд был выполнен из медной проволоки диаметром 0,6 мм и выступал из керамической трубки в область катод–анод на 1 мм. Сама же трубка была закреплена на эмиссионном электроде (см. рис. 3). Измерение концентрации проводилось по стандартной для Ленгмюровского зонда методике, а именно по насыщению на ионной ветви вольт-амперной характеристики. Температура электронов слабо зависела от условий эксперимента и составляла порядка 2 эВ.

В экспериментах в качестве рабочего газа использовался гелий. Давление в вакуумной камере изменялось от единиц до десятков паскаль путем напуска рабочего газа непосредственно в вакуумную камеру.

### Результаты работы и их обсуждение

Как уже было сказано ранее, эффективность извлечения из полого катода оценивалась по величине тока пучка, регистрируемого на коллекторе. На рис. 4 приведены результаты измерений тока пучка для исходной «а» и модернизированных геометрий «б» и «в».

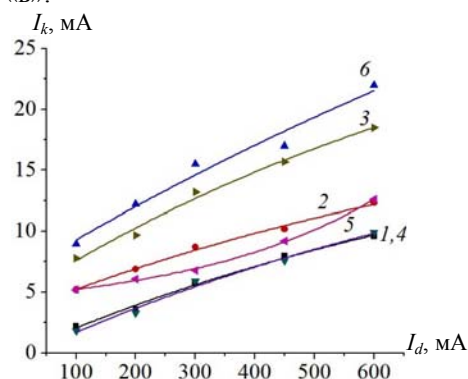


Рис. 4. Зависимость тока пучка от тока разряда для разных геометрий и разных ускоряющих напряжений, давление 30 Па, гелий: 1 – геометрия «а», 10 кВ; 2 – геометрия «б», 10 кВ; 3 – геометрия «в», 10 кВ; 4 – геометрия «а», 18 кВ; 5 – геометрия «б», 18 кВ; 6 – геометрия «в», 18 кВ

Как видно из графика, на всех кривых наблюдается монотонный рост тока пучка с увеличением тока разряда. Следует заметить, что изменение геометрии полого катода, а именно уменьшение внутреннего диаметра, приводит к росту тока пучка и, следовательно, к увеличению эффективности эмиссии. Так, при геометрии «а» максимальный ток пучка составляет 6–7 мА (кривые 1, 4). Изменение геометрии приводит к значительному увеличению тока пучка, так для геометрии «в» максимальный ток пучка составляет уже 20 мА при токе разряда 600 мА. При этом увеличение ускоряющего напряжения от 10 до 18 кВ приводит к росту тока пучка. Геометрия «б», как видно из графика, не приводит к значительному росту тока пучка, к тому же в ходе экспериментов на данной геометрии было выявлено частое «погасание» разряда, что отрицательно влияет на режимы работы плазменного источника электронов.

Результаты изменений концентрации плазмы в разрядном промежутке представлены на рис. 5.

Несмотря на то, что все представленные зависимости концентрации плазмы от тока разряда, как и ожидалось, имеют монотонный рост, изменение геометрии полого катода позволяет в значительной степени увеличить концентрацию. Как видно из графика, для геометрии «б» и «в» концентрация плазмы возрастает в 3–5 раз по сравнению с исходной геометрией «а». Увеличение рабочего давления с 30 до 50 Па также приводит к увеличению концентрации плазмы в промежутке катод–анод.

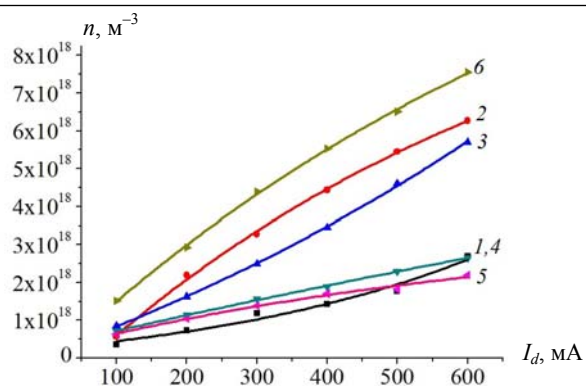


Рис. 5. Зависимость концентрации эмиссионной плазмы от тока разряда для разных геометрий и давлений; 1 – геометрия «а», 30 Па; 2 – геометрия «б», 30 Па; 3 – геометрия «в», 30 Па; 4 – геометрия «а», 50 Па; 5 – геометрия «б», 50 Па; 6 – геометрия «в», 50 Па

По результатам проделанной работы можно сделать выводы о том, что при получении острогофокусированных субмиллиметровых пучков для повышения эффективности эмиссии электронов из полого катода в форвакуумном плазменном источнике электронов, а следовательно, и повышения тока пучка, следует целенаправленно изменять внутреннюю геометрию полого катода.

Работа поддержана грантом РФФИ 16-38-60032 мол\_а\_дк.

#### Литература

1. Кайдалов А.А. Электронно-лучевая сварка и смежные технологии. Киев: Экотехнология, 2004. – 260 с.
2. Казаков А.В. Электронно-лучевой синтез диоксидциркониевой керамики / А.В. Казаков, А.С. Климов, А.А. Зенин // Доклады ТУСУРа. – 2012. – № 2-2 (26). – С. 186–189.
3. Особенности фокусировки электронного пучка плазменного источника в форвакуумном диапазоне давле-

ний / А.А. Зенин, И.Ю. Бакеев, Ю.А. Бурачевский и др. // Письма в ЖТФ. – 2016. – Т. 42, № 13. – С. 104–110.

4. Окс Е.М. Источники электронов с плазменным катодом: физика, техника, применения. – Томск: Изд-во НТЛ. – 2005. – 216 с.

#### Зенин Алексей Александрович

Канд. техн. наук, ст. науч. сотр. каф. физики ТУСУРа  
Тел.: +7 (382-2) 41-33-69  
Эл. почта: zenin1988@gmail.com

#### Климов Алексей Сергеевич

Д-р. техн. наук, ст. науч. сотр. каф. физики ТУСУРа  
Тел.: +7 (382-2) 41-33-69  
Эл. почта: klimov680@gmail.com

#### Николаенко Алексей Николаевич

Магистрант каф. ЭП ТУСУРа  
Тел.: +7 (382-2) 41-33-69  
Эл. почта: axelniko@ya.ru

Zenin A.A., Klimov A.S., Nikolaenko A.N.

#### Improving the efficiency of electron emission from the hollow cathode in the forevacuum plasma electron source

The article presents the results of experiments aimed at improving the efficiency of emission from the hollow cathode plasma in the electron sources functioned in continuous mode in the pressure range 10-30 Pa. It is shown that the change in geometry of the discharge gap (the change of internal diameter and form of the hollow cathode), leads to increasing of the plasma concentration near the region of electron extraction from the plasma and, therefore, increasing the efficiency of emission from the hollow cathode.

**Keywords:** Forevacuum, plasma, electron beams, electron emission from plasma.