

**Влияние продольного магнитного поля на эмиссионные характеристики форвакуумного плазменного источника электронов на основе разряда с полым катодом***И. Ю. Бакеев, А. А. Зенин, А. С. Климов, Е. М. Окс*

*Изучено влияние продольного магнитного поля на эмиссионные характеристики форвакуумного плазменного источника электронов на основе разряда с полым катодом. Показано, что, начиная с некоторого порогового значения индукции  $B_c$ , магнитное поле приводит к уменьшению концентрации плазмы на оси катодной полости. С уменьшением диаметра катодной полости пороговое значение  $B_c$  увеличивается. С другой стороны, продольное магнитное поле позволяет увеличить диаметр эмиссионного канала, что способствует существенному увеличению тока эмиссии электронов из плазмы. При этом степень увеличения тока эмиссии определяется геометрией катодной полости и давлением рабочего газа.*

*Ключевые слова:* электронный пучок, плазменный источник электронов, эмиссионный канал, ток эмиссии, продольное магнитное поле, форвакуумная область давлений.

DOI: 10.51368/1996-0948-2021-4-5-11

**Введение**

Интерес к электронно-пучковым технологиям модификации материалов обусловлен способностью электронных пучков эффективно передавать энергию в локальную область обрабатываемой поверхности [1]. При этом достижение высокой плотности мощности электронного пучка обеспечивает эффективную прецизионную электронно-лучевую обработку изделий, включая сверление отверстий, фрезерование пазов и щелей сложной

конфигурации и др. [2]. Непосредственная прецизионная электронно-лучевая обработка высокотемпературных диэлектрических материалов (различные марки керамики и стекла) затруднена необходимостью принятия специальных мер для нейтрализации зарядки электронным пучком электрически непроводящей поверхности диэлектрика [3]. Развиваемые в настоящее время форвакуумные плазменные источники электронов на основе разряда с полым катодом способны генерировать непрерывные электронные пучки в области повышенных давлений от единиц до сотни паскалей [4]. Создаваемая при таких давлениях пучковая плазма практически полностью нейтрализует процессы зарядки ускоренным электронным пучком диэлектрической поверхности [5]. В связи с этим электронный пучок в форвакуумной области давлений способен обрабатывать диэлектрики так же эффективно, как и изделия из металлов и их сплавов [6–9].

При генерации электронного пучка в форвакуумном диапазоне давлений рассеяние электронов пучка на молекулах рабочего газа, несомненно, затрудняет эффективную фоку-

**Бакеев Илья Юрьевич**<sup>1</sup>, н.с., к.т.н.

E-mail: bakeeviyu@mail.ru

**Зенин Алексей Александрович**<sup>1</sup>, с.н.с., к.т.н.

**Климов Александр Сергеевич**<sup>1</sup>, с.н.с., д.т.н.

**Окс Ефим Михайлович**<sup>1,2</sup>, зав. кафедрой, профессор, д.т.н.

<sup>1</sup> Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники.

Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40.

<sup>2</sup> Институт сильноточной электроники СО РАН.

Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3.

Статья поступила в редакцию 25 мая 2021 г.

© Бакеев И. Ю., Зенин А. А., Климов А. С., Окс Е. М., 2021

сировку электронного пучка. Несмотря на данное затруднение ранее нами в работах [10–12], посвященных изучению условий, обеспечивающих улучшение условий магнитной фокусировки электронного пучка в области повышенных давлений форвакуумного диапазона, в результате оптимизации конструкции и параметров форвакуумного плазменного источника плотность мощности электронного пучка была повышена на порядок величины до  $10^6$  Вт/см<sup>2</sup>. При этом достигнутое значение удельной мощности ограничено нарушением электрической прочности ускоряющего промежутка.

В работе [13] показано, что в форвакуумном плазменном источнике электронов с одиночным эмиссионным каналом стабилизация границы эмиссионной плазмы и, вследствие этого, повышение электрической прочности ускоряющего промежутка может осуществляться продольным магнитным полем в ускоряющем промежутке.

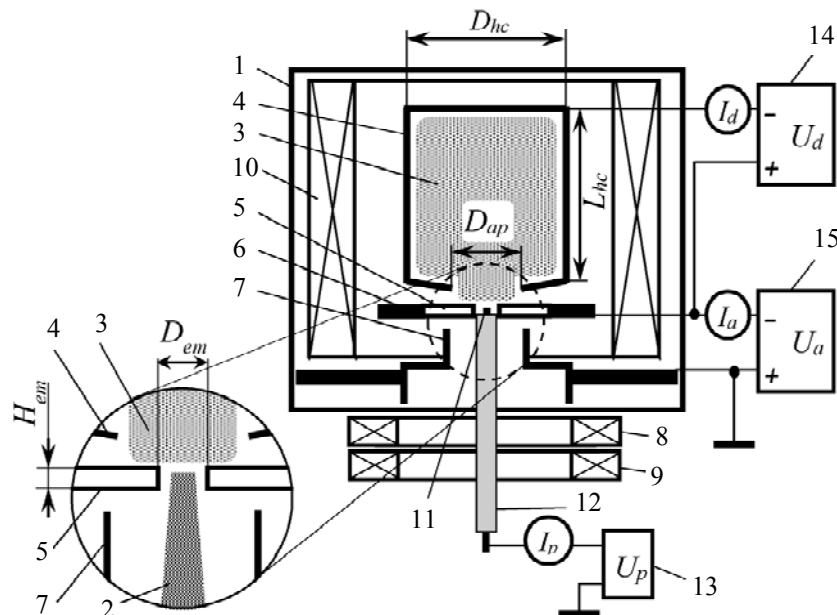
Цель настоящей работы заключалась в исследовании влияния продольного магнитного поля на параметры эмиссионной плазмы и

на характеристики электронного пучка, генерируемого форвакуумным плазменным источником электронов на основе разряда с полым катодом.

## Методика и техника эксперимента

Форвакуумный плазменный источник 1 сфокусированного электронного пучка 2 устанавливался на вакуумной камере, оборудованной лишь одной ступенью механической откачки на основе форвакуумного насоса VocEdwards. Расположение функциональных электродов источника электронов, а также оборудования для диагностики параметров эмиссионной плазмы и электронного пучка схематично представлены на рис. 1.

Принцип работы электронного источника основан на эмиссии электронов из плазмы 3 стационарного тлеющего разряда с полым катодом 4 через одиночный эмиссионный канал цилиндрической формы диаметром  $D_{em}$  и протяженностью  $H_{em}$ , выполненный в эмиссионном электроде 5. Эмиссионный электрод 5



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки и методики эксперимента: 1 – форвакуумный плазменный источник электронов; 2 – электронный пучок; 3 – эмиссионная плазма; 4 – полый катод; 5 – эмиссионный электрод с центральным эмиссионным каналом; 6 – анод; 7 – экстратор; 8 – фокусирующая система; 9 – система отклонения; 10 – магнитная катушка, генерирующая продольное магнитное поле; 11 – одиночный Ленгмюровский зонд; 12 – керамическая трубка; 13 – генератор пилообразного напряжения зонда; 14 – блок питания разряда; 15 – блок питания ускоряющего напряжения. На основном рисунке отображена схема, используемая при измерении параметров эмиссионной плазмы. На выносном элементе отражен фрагмент схемы форвакуумного источника при генерации электронного пучка.

представлял собой металлический диск толщиной  $H_{em}$ , запрессованный в анод 6. Ускорение электронов производилось электрическим полем ускоряющего промежутка, образованного анодом 6 и экстрактором 7. Во избежание нагрева катода 4, анода 6 и экстрактора 7 форвакуумный плазменный источник оснащен системой водяного охлаждения данных электродов. Для фокусировки пучка 2 и управления направлением его распространения форвакуумный плазменный источник оснащен магнитными системами фокусировки 8 (одиночная магнитная линза) и отклонения 9. Магнитные системы фокусировки 8 и отклонения 9 экранированы от разрядной ячейки и ускоряющего промежутка форвакуумного источника и не влияли на процессы эмиссии и формирования электронного пучка. Более подробно конструкция, принцип функционирования и параметры форвакуумного плазменного источника электронов такого типа, а также методики измерений параметров электронного пучка, изложены в [11, 12].

Продольное магнитное поле в объеме разрядно-эмиссионной системы форвакуумного источника создавалось магнитной катушкой 10, охватывающей разрядную ячейку и ускоряющий промежуток электронного источника. Максимальный ток, пропускаемый через катушку 10, составлял 400 мА. При данном токе значение индукции магнитного поля на оси катушки 10 достигало  $B_c = 8$  мТл и приходилось на центр катодной полости. При удалении от центра катодной полости в сторону ускоряющего промежутка до уровня эмиссионного канала на оси источника значение магнитного поля несколько снижается до  $B_c = 6$  мТл. В дальнейшем значения индукции продольного магнитного поля  $B_c$  указаны для уровня эмиссионного канала.

Для обеспечения высокой плотности мощности сфокусированного электронного пучка при эмиссии электронов из плазмы через одиночный эмиссионный канал требуется резко неоднородное радиальное распределение плазмы в катодной полости с максимумом на оси. Ввиду этого измерение концентрации плазмы производилось вблизи эмиссионного канала при помощи одиночного ленгмюровского зонда 11, закрепленного в эмиссионном канале при помощи керамической трубки 12, в

отсутствие ускоряющего поля. Зонд 11 представлял собой титановую проволоку диаметром 0,6 мм, токоприемная часть которой выступает из изолятора на 1 мм. Напряжение на зонд подавалось от генератора пилообразного напряжения 13. Измерение концентрации  $n$  и температуры  $T_e$  плазмы при помощи зонда производилось согласно стандартной методике [14].

Эксперименты по исследованию генерации электронного пучка 2 производились в отсутствие ленгмюровского зонда 11 (показано на выносном элементе рис. 1).

Вакуумная камера откачивалась механическим насосом до предельного давления 1 Па. Затем в нее напускался гелий до рабочего давления  $p = 10\text{--}30$  Па. Ток тлеющего разряда с полым катодом  $I_d$  до 2,4 А и ускоряющее напряжение  $U_a$  до 30 кВ обеспечивались источниками постоянного напряжения  $U_d$  (14) и  $U_a$  (15) соответственно. Ток эмиссии  $I_e$  электронов из плазмы определялся по току нагрузки в цепи высоковольтного источника ускоряющего напряжения  $U_a$  (15).

Изменение размеров катодной полости осуществлялось путем запрессовывания в полость специальных вставок из нержавеющей стали с внутренним диаметром  $D_{hc}$  и протяженностью  $L_{hc}$ . Нижний торец катодной полости был ограничен вставкой из нержавеющей стали, имеющей диаметр выходной апертуры  $D_{ap} = 8$  мм. Расстояние между катодом (нижней кромкой выходной апертуры) и эмиссионным электродом составляло 1 мм. Изменение диаметра эмиссионного канала  $D_{em}$  осуществлялось использованием набора эмиссионных электродов с различным  $D_{em}$  в диапазоне  $D_{em} = 1,0\div 2,2$  мм с шагом 0,1 мм. Протяженность эмиссионного канала (толщина эмиссионного электрода) составляла  $H_{em} = 2$  мм.

## Результаты эксперимента

На рис. 2 представлены зависимости концентрации плазмы на оси форвакуумного плазменного источника электронов для различных геометрий катодной полости. При этом зондовые измерения показали, что температура плазмы в условиях экспериментов меняется слабо и имеет величину порядка  $T_e = 2$  эВ.

Из рис. 2 видно, что магнитное поле влияет различным образом на значения концентрации плазмы для различных размеров катодной полости. Так, для катодной полости сравнительно большого объема ( $L_{hc} = 120$  мм,  $D_{hc} = 40$  мм) концентрация  $n$  падает по мере увеличения индукции магнитного поля до величины  $B_c = 3$  мТл, после которой наблюдается небольшой рост  $n$  (кривая 1 на рис. 2). При уменьшении протяженности катодной полости ( $L_{hc} = 60$  мм,  $D_{hc} = 40$  мм) в случае отсутствия магнитного поля концентрация  $n$  увеличивается двукратно (кривая 2 на рис. 2), однако при увеличении  $B_c$  концентрация  $n$  также резко падает и при  $B_c > 1,5$  мТл зависимости  $n(B_c)$  на кривых 1 и 2 практически совпадают. Подобный вид зависимости  $n(B_c)$  сохраняется и при прочих протяженностях катодной полости, однако максимальное значение концентрации порядка  $n = 6 \times 10^{17}$  м<sup>-3</sup> обеспечивается при  $L_{hc} = 60$  мм (кривая 2 на рис. 2), уменьшение или увеличение  $L_{hc}$  приводит к уменьшению значений концентрации на участке  $B_c < 1,5$  мТл.

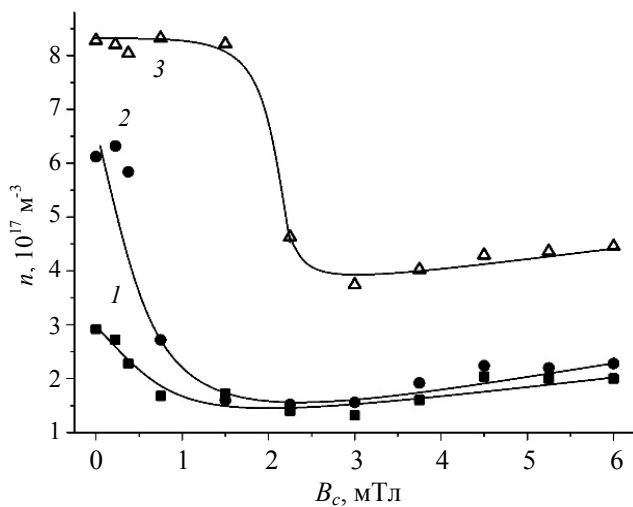


Рис. 2. Зависимости концентрации плазмы  $n$  на оси от индукции магнитного поля  $B_c$  для различных размеров катодной полости: 1 –  $L_{hc} = 120$  мм,  $D_{hc} = 40$  мм; 2 –  $L_{hc} = 60$  мм,  $D_{hc} = 40$  мм; 3 –  $L_{hc} = 60$  мм,  $D_{hc} = 20$  мм. Давление  $p = 10$  Па. Ток разряда  $I_d = 1000$  мА.

При уменьшении же диаметра катодной полости ( $L_{hc} = 60$  мм,  $D_{hc} = 20$  мм) характер зависимости  $n(B_c)$  меняется. На начальном участке зависимости концентрация остается неизменной по мере увеличения магнитного поля (при  $B_c < 1,5$  мТл кривая 3 на рис. 2). При дальнейшем увеличении  $B_c$  резкое падение

концентрации сменяется слабо растущим участком при  $B_c > 3$  мТл. Резкое падение концентрации на зависимостях  $n(B_c)$  на рис. 2 вероятно обусловлено тем, что магнитное поле осложняет свободную осцилляцию электронов в полости ввиду движения электронов вдоль силовых линий магнитного поля по спиралевидной траектории, из-за чего уменьшается путь, пройденный электронами в катодной полости. В конечном счете, это приводит к уменьшению количества актов ионизации, совершаемых каждым электроном, что и приводит к уменьшению концентрации на оси. В случае катодной полости большего диаметра (кр. 1 и 2 на рис. 2) даже небольшого магнитного поля достаточно для осложнения осцилляции электронов в полости требует уменьшения ларморовского радиуса, из-за чего падение концентрации происходит при магнитном поле с  $B_c > 1,5$  мТл.

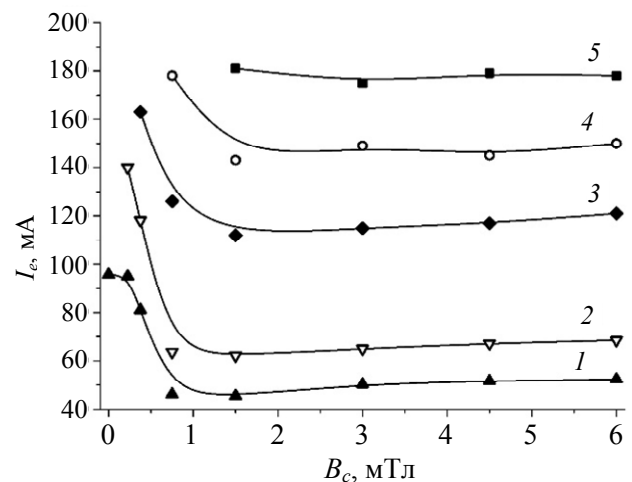


Рис. 3. Зависимости тока пучка  $I_b$  от индукции магнитного поля  $B_c$  на оси разрядно-эмиссионной системы для различных диаметров эмиссионного канала: 1 –  $D_{em} = 1,8$  мм; 2 –  $D_{em} = 2,0$  мм; 3 –  $D_{em} = 2,2$  мм; 4 –  $D_{em} = 2,4$  мм; 5 –  $D_{em} = 2,5$  мм ( $L_{hc} = 60$  мм,  $D_{hc} = 40$  мм;  $p = 10$  Па;  $U_a = 30$  кВ. Ток разряда  $I_d = 1000$  мА).

На рис. 3 представлены зависимости тока эмиссии  $I_e$  от индукции магнитного поля  $B_c$  для различных диаметров эмиссионного канала  $D_{em}$ . Проведенные эксперименты показали, что максимальный диаметр эмиссионного канала, при котором обеспечивается эмиссия электронов при сохранении электрической прочности ускоряющего промежутка в отсутствии продольного магнитного поля, состав-

ляет  $D_{em} = 1,8$  мм (кр. 1 на рис. 3). При этом вид зависимости  $I_e(B_c)$  коррелирует с зависимостью  $n(B_c)$ , представленной на рис. 2. Однако создание магнитного поля позволяет обеспечить сохранение электрической прочности ускоряющего промежутка и при больших диаметрах эмиссионного канала  $D_{em}$  (кр. 2–5 на рис. 3). Так, магнитное поле с индукцией на оси  $B_c = 0,25$  мТл позволяет увеличить диаметра эмиссионного канала до  $D_{em} = 2,0$  мм (кр. 2 на рис. 3), в то время как при максимально возможном в условиях эксперимента диаметре  $D_{em} = 2,5$  мм эмиссия электронов обеспечивается лишь при обеспечении магнитного поля с индукцией  $B_c > 1,5$  мТл. Возможность увеличения диаметра эмиссионного канала при сохранении электрической прочности ускоряющего промежутка по мере увеличения магнитного поля однозначно свидетельствует о том, что продольное магнитное поле способствует стабилизации плазменной границы при эмиссии электронов из одиночного эмиссионного канала форвакуумного плазменного источника.

Помимо возможности увеличения диаметра эмиссионного канала при продольном магнитном поле, важным фактом является то, что это приводит к увеличению максимального тока эмиссии (см. рис. 3). Более наглядно это представлено на зависимостях максимального тока эмиссии от диаметра эмиссионного канала  $I_{em}(D_{em})$  на рис. 4.

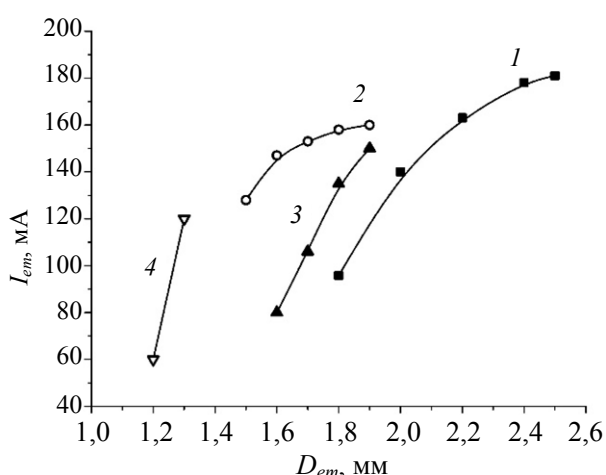


Рис. 4. Зависимости максимального тока эмиссии  $I_{em}$  от диаметра эмиссионного канала  $D_{em}$  для различных геометрий катодной полости и давлениях рабочего газа: 1 –  $L_{hc} = 60$  мм,  $D_{hc} = 40$  мм;  $p = 10$  Па; 2 –  $L_{hc} = 60$  мм,  $D_{hc} = 20$  мм;  $p = 10$  Па; 3 –  $L_{hc} = 60$  мм,  $D_{hc} = 40$  мм;  $p = 30$  Па; 4 –  $L_{hc} = 60$  мм,  $D_{hc} = 20$  мм;  $p = 30$  Па ( $U_a = 30$  кВ; Ток разряда  $I_d = 1000$  мА).

Так, из рис. 4 (кр. 1) видно, что в результате увеличения диаметра эмиссионного канала благодаря продольному магнитному полю максимальный ток эмиссии увеличивается со 100 мА (при  $D_{em} = 1,8$  мм и  $B_c = 0$ ) до 180 мА (при  $D_{em} = 2,5$  мм и  $B_c = 1,5$  мТл. Аналогичное увеличение тока эмиссии наблюдается и для геометрии катодной полости –  $L_{hc} = 60$  мм,  $D_{hc} = 20$  мм (кр. 2 на рис. 4). Различия, по сравнению с геометрией –  $L_{hc} = 60$  мм,  $D_{hc} = 40$  мм (кр. 1), заключаются в том, что максимальное значение тока эмиссии порядка  $I_e = 130$  мА в отсутствие продольного магнитного поля обеспечивается при меньшем диаметре эмиссионного канала  $D_{em} = 1,5$  мм, что обусловлено большей концентрацией плазмы на оси при геометрии с меньшим диаметром. Увеличение магнитного поля позволяет увеличить диаметр эмиссионного канала у узкой геометрии катодной полости вплоть до  $D_{em} = 1,9$  мм, при котором обеспечивается максимальный ток эмиссии  $I_e = 160$  мА, т. е. меньше на 20 мА по сравнению с геометрией с широким катодом. Наиболее вероятной причиной этого может служить различие в радиальной однородности распределения плазмы. Так, при узкой катодной полости обеспечивается резко неоднородная плазма с максимальным значением концентрации на оси (рис. 2, кр. 3), что обеспечивает большую плотность тока при сравнительно малых диаметрах эмиссионного канала. С другой стороны, при широкой катодной полости обеспечивается более однородное радиальное распределение плазмы, что облегчает стабилизацию плазменной границы при более больших диаметрах эмиссионного канала, что и приводит увеличению максимального тока эмиссии (рис. 4, кр. 1). При увеличении давления рабочего газа тенденции зависимостей  $I_{em}(D_{em})$  сохраняются (рис. 4, кр. 3 и 4). Увеличение давления рабочего газа приводит к уменьшению диаметров эмиссионного канала, при которых обеспечивается эмиссия при сохранении электрической прочности ускоряющего промежутка, и уменьшению максимальных значений тока эмиссии.

### Заключение

Изучено влияние продольного магнитного поля на эмиссионные характеристики форвакуумного плазменного источника электро-

нов на основе разряда с полым катодом. Показано, что продольное магнитное поле приводит к уменьшению концентрации плазмы на оси катодной полости. Значение индукции магнитного поля на оси, после которого происходит данное уменьшение концентрации, увеличивается при уменьшении диаметра катодной полости. Показано, что продольное магнитное поле позволяет увеличить диаметр эмиссионного канала, что способствует увеличению тока эмиссии. При катодной полости  $L_{hc} = 60$  мм,  $D_{hc} = 40$  мм степень увеличения тока эмиссии может составлять величину 1,8 по сравнению с максимальным током эмиссии, обеспечиваемым в отсутствие продольного магнитного поля. Для узкой катодной полости ( $L_{hc} = 60$  мм,  $D_{hc} = 20$  мм) эмиссия при условии обеспечения электрической прочности ускоряющего промежутка производится при меньших диаметрах канала по сравнению с широкой полостью, максимальный ток эмиссии при этом достигает меньшего значения. Увеличение давления рабочего газа приводит к уменьшению диаметров эмиссионного канала, при которых сохраняется электрическая прочность ускоряющего промежутка. Максимальный ток эмиссии уменьшается при увеличении давления.

Работа выполнена в рамках госзадания  
Министерства науки и высшего  
образования РФ проект FEWM-2020-0038.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Рыкалин Н. Н., Зуев И. В., Углов А. А. Основы электронно-лучевой обработки материалов. – М.: Машиностроение, 1978.
2. Рыкалин Н. Н., Углов А. А., Зуев И. В., Кокора А. Н. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов. – М.: Машиностроение, 1985.
3. Филачев А. М., Фукс Б. И. // Прикладная физика. 1996. № 3. С. 39.
4. Бурдовицин В. А., Климов А. С., Медовник А. В., Окс Е. М., Юшков Ю. Г. Форвакуумные плазменные источники электронов. – Томск: Издательство Томского университета, 2014.
5. Burdovitsin V. A., Klimov A. S., Oks E. M. // Tech. Phys. Lett. 2009. Vol. 35. № 6. P. 511.
6. Burdovitsin V. A., Klimov A. S., Medovnik A. V., Oks E. M. // Plasma Sources Science and Technology. 2010. Vol. 19. № 5. P. 055003.
7. Медовник А. В., Бурдовицин В. А., Климов А. С., Окс Е. М. // Физика и химия обработки материалов. 2010. № 3. С. 39.
8. Goreev A. K., Burdovitsin V. A., Klimov A. S., Oks E. M. // Inorganic materials: applied research. 2012. Vol. 3. № 5. P. 446.
9. Зенин А. А., Климов А. С. // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2013. Т. 27. № 1. С. 10.
10. Bakeev I. Yu., Klimov A. S., Oks E. M., Zenin A. A. // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. 2018. Vol. 1115. P. 032001.
11. Bakeev I., Klimov A., Oks E., Zenin A. // Plasma Sources Sci. Technol. 2018. Vol. 27. № 7. P. 075002.
12. Bakeev I. Yu., Klimov A. S., Oks E. M., Zenin A. A. // Rev. Sci. Instrum. 2019. Vol. 90. P. 023302.
13. Журков И. С., Бурдовицин В. А., Окс Е. М. // Журнал технической физики. 2007. Т. 77. № 9. С. 115.
14. Hopkins M. B., Graham W. G. // Rev. Sci. Instrum. 1986. Vol. 57. № 9. P. 2210.

PACS: 41.75.Fr

## Effect of a longitudinal magnetic field on the emission characteristics of a forevacuum plasma electron source based on a hollow cathode discharge

*I. Yu. Bakeev<sup>1</sup>, A. A. Zenin<sup>1</sup>, A. S. Klimov<sup>1</sup>, and E. M. Oks<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics  
40 Lenina Prospect, Tomsk, 634050, Russia  
E-mail: bakeeviyu@mail.ru

<sup>2</sup> Institute of High Current Electronics, SB RAS  
2/3 Akademicheskoy Ave., Tomsk, 634055, Russia

Received May 25, 2021

*The effect of a longitudinal magnetic field on the emission characteristics of a forevacuum plasma electron source based on a discharge with a hollow cathode is studied. It is shown that,*

*starting from a certain threshold value of the induction  $B_c$ , the magnetic field leads to a decrease in the plasma concentration on the axis of the cathode cavity. With a decrease in the diameter of the cathode cavity, the threshold value of  $B_c$  increases. On the other hand, the longitudinal magnetic field makes it possible to increase the diameter of the emission channel, which contributes to a significant increase in the current of electron emission from the plasma. In this case, the degree of increase in the emission current is determined by the geometry of the cathode cavity and the pressure of the working gas.*

*Keywords:* electron beam, plasma electron source, emission channel, emission current, longitudinal magnetic field, forevacuum pressure range

**DOI:** 10.51368/1996-0948-2021-4-5-11

## REFERENCES

1. N. N. Rykalin, I. V. Zuev, and A. A. Uglov, *Fundamentals of electron-beam treatment of materials* (Mashinostroenie, Moscow, 1978) [in Russian].
2. N. N. Rykalin, A. A. Uglov, I. V. Zuev, and A. N. Kokora, *Laser and electron-beam processing of materials* (Mashinostroenie, Moscow, 1985) [in Russian].
3. A. M. Filachev and B. I. Fouks, *Applied Physics*, No. 3, 39 (1996) [in Russian].
4. V. A. Burdovitsin, A. S. Klimov, A. V. Medovnik, E. M. Oks, and Yu. G. Yushkov, *Forevacuum Plasma Electron Sources* (Izd. Tomsk. univer., Tomsk, 2014) [in Russian].
5. V. A. Burdovitsin, A. S. Klimov, and E. M. Oks, *Tech. Phys. Lett.* **35** (6), 511 (2009).
6. V. A. Burdovitsin, A. S. Klimov, A. V. Medovnik, and E. M. Oks, *Plasma Sources Science and Technology* **19**, 055003 (2010).
7. A. V. Medovnik, V. A. Burdovitsin, A. S. Klimov, and E. M. Oks, *Fiz. Khim. Obrab. Mater.* **3**, 39 (2010).
8. A. K. Goreev, V. A. Burdovitsin, A. S. Klimov, and E. M. Oks, *Inorganic materials: applied research.* **3** (5), 446 (2012).
9. A. A. Zenin and A. S. Klimov, *Doklady Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta Sistem Upravleniya I Radioelektroniki* **1** (27), 10 (2013).
10. I. Yu. Bakeev, A. S. Klimov, E. M. Oks, and A. A. Zenin, *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series.* **1115**, 032001 (2018).
11. I. Yu. Bakeev, A. S. Klimov, E. M. Oks, and A. A. Zenin, *Plasma Sources Sci. Technol.* **27** (7), 075002 (2018).
12. I. Yu. Bakeev, A. S. Klimov, E. M. Oks, and A. A. Zenin, *Rev. Sci. Instrum.* **90**, 023302 (2019).
13. I. S. Zhirkov, V. A. Burdovitsin, and E. M. Oks, *Technical Physics* **52** (9), 1217 (2007).
14. M. B. Hopkins and W. G. Graham, *Review of scientific instruments* **57** (9), 2210 (1986).