

УДК 537.533

ФОРВАКУУМНЫЙ ПЛАЗМЕННЫЙ ИСТОЧНИК СФОКУСИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

© 2019 г. И. Ю. Бакеев^{1, *}, А. С. Климов¹, Е. М. Окс^{1, 2}, А. А. Зенин¹

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники
Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, Россия

*E-mail: bakeeviyu@mail.ru

Поступила в редакцию 20.05.2019 г.

После доработки 20.06.2019 г.

Принята к публикации 27.07.2019 г.

В статье представлены конструкция и характеристики, а также описаны особенности функционирования форвакуумного плазменного источника, предназначенного для генерации в области давлений до 30 Па сфокусированного электронного пучка с энергией пучка до 30 кэВ, и плотностью мощности пучка в кроссовере порядка 10^6 Вт/см².

DOI: 10.1134/S0367676519110048

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время электронные пучки [1] находят широкое применение для локального теплового воздействия на различные металлические материалы в таких операциях как резка, сварка, испарение, наплавка. Среди электронных источников выделяются устройства с плазменным катодом [2, 3] благодаря отсутствию в них накаливаемых до термоэмиссионных температур элементов конструкции, и способности генерировать пучки с плотностью мощности вплоть до 10^7 Вт/см².

Форвакуумные плазменные источники электронов [4, 5], обеспечивающие генерацию пучка в диапазоне давлений от единиц до сотни паскалей, в отличие от традиционных плазменных источников, работающих в диапазоне давлений до 10^{-1} Па, способны эффективно обрабатывать электрически непроводящие материалы, такие как высокотемпературные марки керамики, стекла. Способность таких источников к эффективной обработке диэлектриков без применения дополнительных средств компенсации отрицательного заряда на обрабатываемой поверхности связана с воздействием на поверхность потока ионов из пучковой плазмы. Пучковая плазма генерируется за счет ионизации рабочего газа электронами пучка, а также в результате зажигания поддерживаемого электронным пучком разряда между обрабатываемой поверхностью и стенками вакуумной камеры [6]. Поток ионов из пучковой плазмы на обрабатываемую поверхность нейтрализует отрицательный заряд электронного пучка. Именно поэтому по-

тенциал поверхности диэлектрической мишени, хотя и остается отрицательным, но его величина становится значительно меньше ускоряющего напряжения [6].

При формировании и транспортировке электронного пучка в области повышенных давлений рассеяние пучка на молекулах остаточной газовой атмосферы затрудняет эффективную фокусировку электронного пучка. Несмотря на данное затруднение ранее нами в работах [7–9], 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/см².

Цель настоящей работы заключается в исследовании основных характеристик форвакуумного плазменного источника электронов, предназначенного для генерации сфокусированного электронного пучка с плотностью мощности 10^6 Вт/см².

МЕТОДИКА И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Конструкция и внешний вид форвакуумного плазменного источника I электронов, предназначенного для генерации сфокусированных непрерывных пучков 2 , представлены на рис. 1. Принцип работы электронного источника основан на

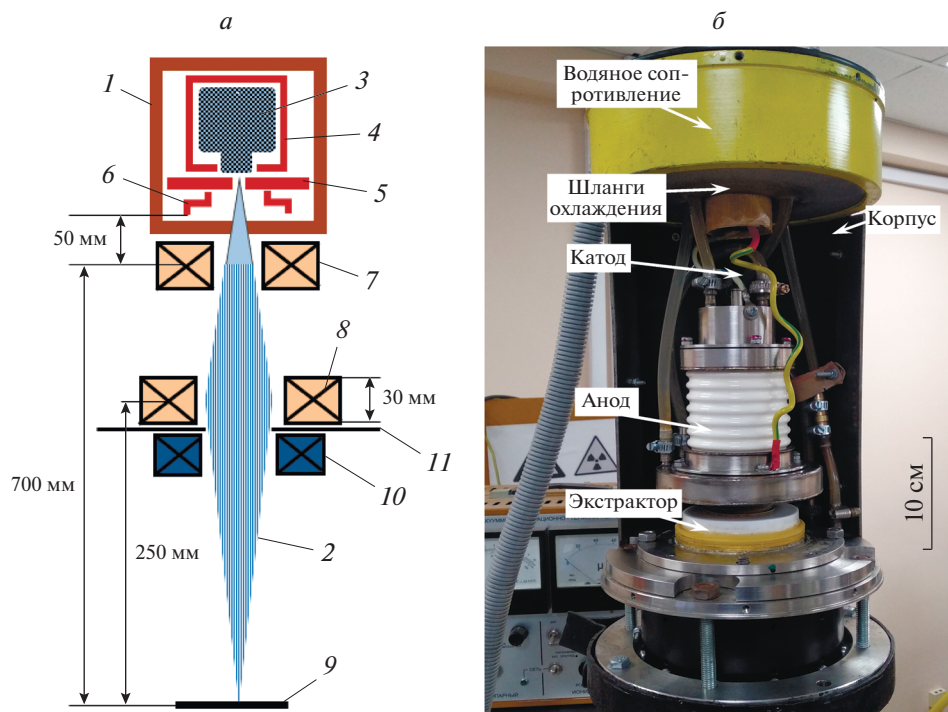


Рис. 1. Конструкция (а) и внешний вид (б) форвакуумного плазменного источника сфокусированного непрерывного пучка электронов: 1 – форвакуумный источник электронов; 2 – электронный пучок; 3 – эмиссионная плазма; 4 – полый катод; 5 – анод; 6 – экстрактор; 7 – дополнительная фокусирующая катушка; 8 – основная фокусирующая катушка; 9 – плоскость измерения параметров пучка; 10 – отклоняющая магнитная система; 11 – магнитный экран.

эмиссии электронов из плазмы 3 стационарного тлеющего разряда с полым катодом 4 через одиночный эмиссионный канал диаметром D_{em} в аноде 5. Ускорение электронов производили электрическим полем ускоряющего промежутка, образованного анодом 5 и экстрактором 6. Подробно конструкция форвакуумного источника, и методики измерений параметров электронного пучка, изложены в [7].

Для фокусировки электронного пучка используется магнитное поле двойной фокусирующей системы. Основная катушка 8 обеспечивает положение кроссовера в плоскости коллектора 9, тогда как дополнительная катушка 7 стабилизирует расходимость электронного пучка.

Конфигурация и размеры всех функциональных узлов форвакуумного источника выбраны на основе проведенных исследований [7–9] и они обеспечивают наилучшие условия магнитной фокусировки электронного пучка и максимальные удельные параметры пучка. Оптимальная геометрия электродов источника: диаметр и протяженность катодной полости – 20 и 40 мм соответственно; диаметр выходной апертуры катодной полости – 8 мм; толщина эмиссионного электрода – 2 мм; протяженность ускоряющего промежутка – 7 мм; диаметр отверстия в экстракторе – 4 мм; расстояние между нижним тор-

цом магнитной катушки дополнительной фокусирующей системы и плоскостью коллектора – 250 мм. Величина индукция магнитного поля в центре дополнительной катушки № 1 составляла $B_{ac} = 15.5$ мТл. Магнитное поле основной катушки № 2 выбирали таким образом, чтобы обеспечить положение фокальной плоскости в плоскости коллектора, и получить в центре катушки величину $B_{mc} = 10$ мТл. Характеристики форвакуумного источника сравнивали для двух диаметров эмиссионного канала $D_{em} = 0.7$ и $D_{em} = 1.5$ мм.

Измерение диаметра d_b электронного пучка производили стандартным методом “отклонения” [10]. Отклонение электронного пучка от оси системы производили при помощи магнитной катушки 10, расположенной вблизи основной катушки 8 (рис. 1) Для ослабления влияния магнитного поля фокусирующей катушки на магнитное поле отклоняющей системы, основная катушка была оборудована магнитным экраном 11 с центральным отверстием диаметром 50 мм. Ток пучка I_b измеряли путем отведения электронного пучка на отдельно стоящий цилиндр Фарадея. Измерения параметров плазмы (температура T_e и концентрация n) на оси катодной полости осуществляли одиночным ленгмюровским зондом в отсутствие ускоряющего напряжения согласно методике, изложенной в [11].

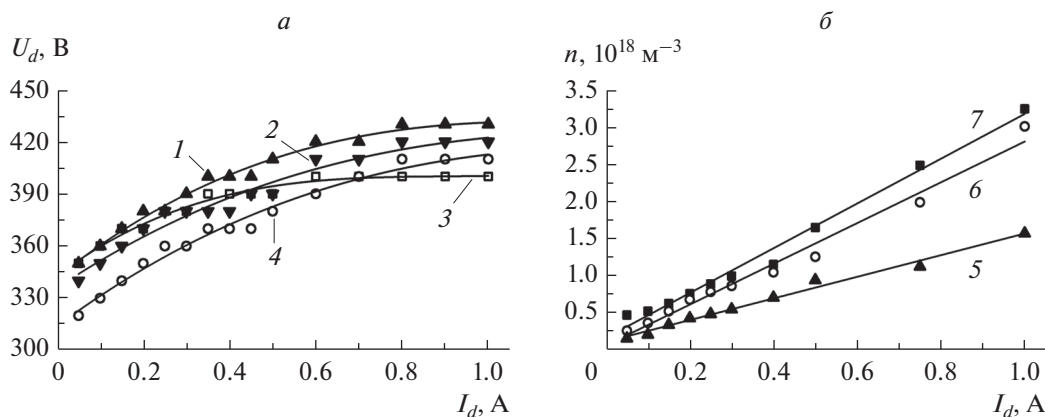


Рис. 2. Вольтамперные характеристика разряда $U_d(I_d)$ (а) и зависимости концентрации плазмы n на оси полого катода форвакуумного источника от тока разряда I_d (б) при различных ускоряющих напряжениях U_a и давлениях p рабочего газа: 1 – $p = 10$ Па, $I_d = 0.5$ А; 2 – $p = 30$ Па, $I_d = 0.5$ А; 3 – $p = 10$ Па, $I_d = 1$ А; 4 – $p = 30$ Па, $I_d = 1$ А; 5 – $p = 10$ Па; 6 – $p = 20$ Па; 7 – $p = 30$ Па.

Вакуумную камеру откачивали механическим насосом до предельного давления 1 Па. Затем в нее напускали гелий до рабочего давления $p = 10\text{--}30$ Па. Ток разряда I_d в экспериментах изменялся в пределах 0.1–1 А. Ускоряющее напряжение U_a варьировали от 0 до 30 кВ.

ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОНОВ

Характеристики и параметры плазменного источника электронов однозначно определяются характеристиками разрядной системы электронного источника и достигнутыми параметрами эмиссионной плазмы. Вольтамперные характеристики разряда с полым катодом и зависимости концентрации плазмы на оси полого катода от тока разряда форвакуумного плазменного источника представлены на рис. 2а и 2б соответственно. Видно, что напряжение горения разряда U_d составляет 350–420 В и растет по мере увеличения разрядного тока I_d (рис. 2а, кривая 1). Повышение ускоряющего напряжения U_a (кривая 2) и рост давления газа p (кривые 3 и 4) приводит к снижению напряжения горения разряда U_d на 10–30 В.

В условиях эксперимента температура электронов плазмы оставалась практически постоянной и составляла величину $T_e \approx 2$ эВ. Из рис. 2б видно, что концентрация плазмы n линейно растет с увеличением разрядного тока I_d . Повышение давления рабочего газа приводит к росту крутизны зависимости $n(I_d)$. Так, увеличение давления p с 10 Па (кривая 5, рис. 2б) до 30 Па при использовании в качестве рабочего газа гелия приводит к росту значений концентрации плазмы более чем в два раза (кривая 7, рис. 2б). При токе разряда $I_d = 1$ А концентрация достигает уровня $n = 1.5 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$ при давлении $p = 10$ Па, при давлении $p = 30$ Па –

$n = 3.2 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$. Достигнутые параметры плазмы обеспечивают возможность эмиссии с нее электронов с плотностью тока вплоть до 10 А/см^2 .

Вольтамперные и эмиссионные характеристики электронного источника, а также зависимости минимального диаметра электронного пучка от ускоряющего напряжения и тока электронного пучка представлены на рис. 3а–3г, соответственно.

Как можно видеть на рис. 3а, зависимость тока электронного пучка I_b от ускоряющего напряжения U_a содержит в пределах ускоряющего напряжения 2–4 кВ участок резкого роста тока. Далее рост замедляется и наблюдается тенденция к насыщению (кривые 1, 2 на рис. 3а). Такой вид зависимости $I_b(U_a)$ характерен для плазменных электронных источников [11] и подтверждает наличие ускоренного электронного пучка. Однако в отличие от плазменных источников, функционирующих в традиционной области давлений, на участке насыщения при $U_a > 4$ кВ увеличение ускоряющего напряжения приводит к дальнейшему росту тока, что особенно заметно при повышенном давлении рабочего газа (кривые 3, 4 на рис. 3а). Так, на кривой 4 на рис. 3а при $p = 30$ Па и $I_d = 1$ А по мере увеличения ускоряющего напряжения U_a с 4 до 30 кВ ток пучка I_b возрастает с 45 до 75 мА. Указанный рост тока пучка связан с особенностями функционирования плазменного источника электронов в форвакуумной области давлений, а именно с изменением параметров эмиссионной плазмы при наличии обратного ионного потока из ускоряющего промежутка и, вследствие этого повышения тока эмиссии электронов из плазмы [11]. Увеличение давления p с 10 до 30 Па приводит к увеличению тока пучка на величину более 15 мА при диаметре эмиссионного канала $D_{em} = 1.5$ мм (кривые 2, 4 на рис. 3а). При $D_{em} = 0.7$ мм при подобном росте давления ток

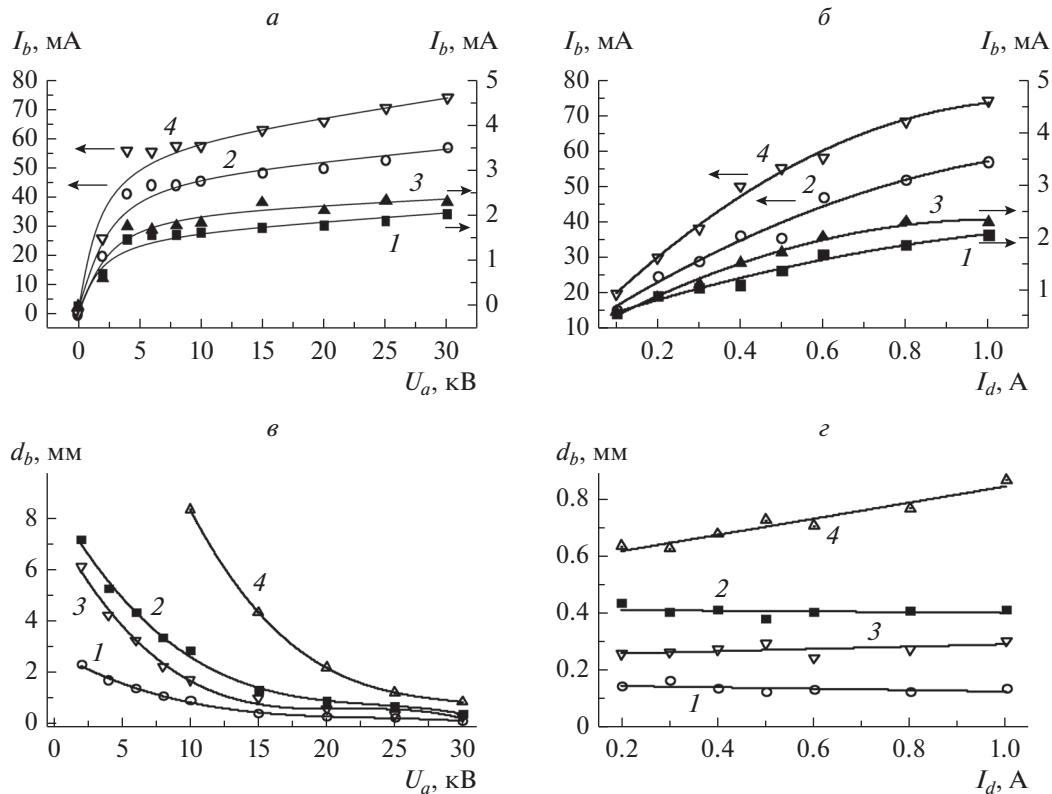


Рис. 3. Зависимости тока I_b (а, б) и диаметра d_b (в, г) электронного пучка от ускоряющего напряжения (а, в) и тока разряда (б, г) при различных давлениях p рабочего газа (гелия) и диаметрах эмиссионного канала D_{em} (гелий): а – ток разряда $I_d = 1$ А; б – ускоряющее напряжение $U_a = 30$ кВ: 1 – $p = 10$ Па, $D_{em} = 0.7$ мм; 2 – $p = 10$ Па, $D_{em} = 1.5$ мм; 3 – $p = 30$ Па, $D_{em} = 0.7$ мм; 4 – $p = 30$ Па, $D_{em} = 1.5$ мм.

пучка практически не изменяется (кривые 1 и 3 на рис. 3а).

Из представленных на рис. 3б зависимостей $I_b(I_d)$ видно, что ток пучка I_b монотонно растет по мере увеличения тока разряда I_d . Однако в отличие от линейного роста концентрации плазмы на рис. 2б, крутизна кривой $I_b(I_d)$, а также эффективность извлечения, уменьшаются по мере увеличения тока разряда I_d . Разрядный ток I_d в интервале 0.1–1 А позволяет задавать ток пучка I_b в пределах 70% от его максимального значения.

Как видно из рис. 3в диаметр электронного пучка d_b резко уменьшается по мере увеличения ускоряющего напряжения U_a . В связи с этим эффективная фокусировка электронного пучка до диаметра менее 1 мм обеспечивается лишь при ускоряющем напряжении U_a свыше 20 кВ. При изменении тока разряда I_d при давлении $p = 10$ Па (кривые 1, 2 на рис. 3г) и диаметре эмиссионного канала $D_{em} = 0.7$ мм (кривые 1, 3 на рис. 3г) диаметр пучка d_b остается постоянным. При $p = 10$ Па и $D_{em} = 0.7$ мм наблюдается линейный рост d_b при увеличении I_d (кривая 4 на рис. 3г), связанный с изменением условий магнитной фокусировки из-

за смещения эмиссионной плазменной границы. Также на рис. 4г видно, что наименьший диаметр пучка $d_b = 0.15$ мм обеспечивается при давлении $p = 10$ Па и диаметре эмиссионного канала $D_{em} = 0.7$ мм (кривая 1). При увеличении давления до $p = 30$ Па диаметр пучка возрастает до $d_b = 0.25$ мм из-за увеличения интенсивности рассеяния электронов на молекулах рабочего газа. При диаметре эмиссионного канала $D_{em} = 0.7$ мм наименьший диаметр составляет $d_b = 0.4$ мм при давлении $p = 10$ Па.

Влияние ускоряющего напряжения и тока разряда на достижение максимальной плотности мощности электронного пучка продемонстрировано на рис. 4. Увеличение ускоряющего напряжения U_a вызывает резкий рост плотности мощности пучка q при напряжениях свыше 15 кВ (рис. 4а). К этому приводит как возрастание энергии электронов, так и повышение плотности тока пучка в кроссовере при увеличении тока пучка (рис. 3а), а также уменьшение диаметра пучка (рис. 3в). Увеличение тока I_d разряда при $p = 10$ Па приводит к монотонному росту плотности мощности q (кривые 1, 2 на рис. 4б). Так, при диаметре эмиссионного канала $D_{em} = 1.5$ мм обеспечивается макси-

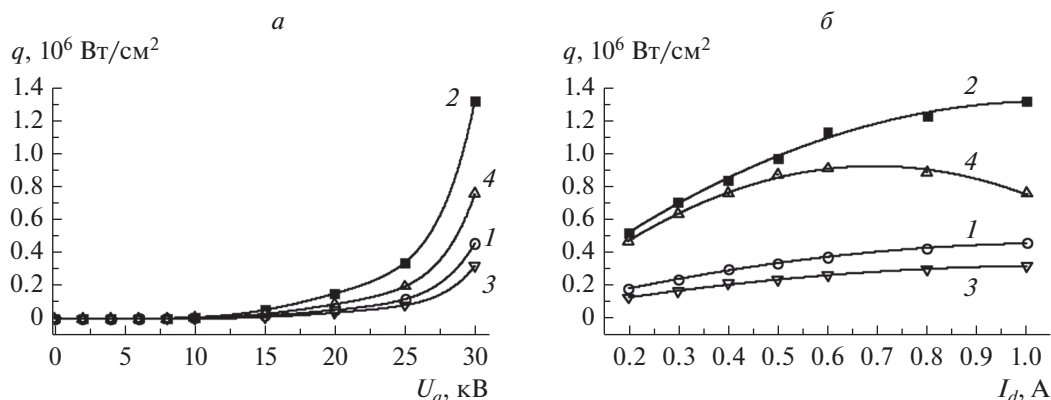


Рис. 4. Зависимости плотности мощности электронного пучка q от ускоряющего напряжения U_a (а) и тока разряда I_d (б) при различных давлениях p рабочего газа (гелия) и диаметрах эмиссионного канала D_{em} (гелий; а – ток разряда $I_d = 1$ А; б – ускоряющее напряжение $U_a = 30$ кВ): 1 – $p = 10$ Па, $D_{em} = 0.7$ мм; 2 – $p = 10$ Па, $D_{em} = 1.5$ мм; 3 – $p = 30$ Па, $D_{em} = 0.7$ мм; 4 – $p = 30$ Па, $D_{em} = 1.5$ мм.

мальная плотность мощности электронного пучка $q = 1.3 \cdot 10^6$ Вт/см² (кривая 2) при диаметре пучка $d_b = 0.4$ мм. При этом для $D_{em} = 0.7$ мм, при котором обеспечивается режим с минимальным диаметром пучка $d_b = 0.15$ мм, плотность мощности меньше и достигает значения $q = 0.4 \cdot 10^6$ Вт/см² (кривая 2 на рис. 4б). Однако данный уровень плотности мощности также является достаточным для некоторых применений. Увеличение давления p приводит к падению плотности мощности q (кривые 3 и 4 на рис. 4б) из-за роста диаметра пучка. При $D_{em} = 0.7$ мм это приводит лишь к абсолютному уменьшению q (кривая 3 на рис. 4б), в то время, как при $D_{em} = 1.5$ мм наблюдается появление спадающего участка при $I_d > 0.6$ А (кривая 2 на рис. 4б).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты исследования основных характеристик и особенностей работы форвакуумного плазменного источника с двойной фокусирующей системой, предназначенного для генерации сфокусированного электронного пучка с высокой плотностью мощностью. Были исследованы: вольтамперные характеристики разряда и зависимости концентрации плазмы в катодной полости, а также влияние тока разряда, ускоряющего напряжения и диаметра эмиссионного канала на параметры электронного пучка (минимальный диаметр, ток, плотность мощности). Электронный пучок, генерируемый форвакуумным источником, с достигнутыми параметрами (плотность мощности до $1.3 \cdot 10^6$ Вт/см² и диаметром менее 0.4 мм) можно эффективно использовать для прецизионной плавки и резки диэлектриков с высокой температурой плавления (керамика, стекло).

Работы по изучению характеристик разряда с полым катодом форвакуумного источника осуществлялись при поддержке грантом РФФИ № 19-48-700004. Работы по исследованию удельных параметров пучка при магнитной фокусировке выполнены при поддержке грантом Президента РФ для молодых ученых – докторов наук № МД-2649.2019.8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алехнович В.Н., Алифанов А.В., Гордиенко А.И. и др.* Электронно-лучевая обработка материалов. Минск: Белорусская наука, 2006.
2. *Osipov I.V., Rempe N.G.* // Rev. Sci. Instr. 2000. V. 71. № 4. P. 1638.
3. *Корнилов С.Ю., Ремпе Н.Г.* // ЖТФ. 2012. Т. 82. № 2. С. 79.
4. *Burdovitsin V.A., Zhirkov I.S., Oks E.M. et al.* // Instr. Exp. Techn. 2005. V. 48. № 6. P. 761.
5. *Kazakov A.V., Burdovitsin V. A., Medovnik A.V. et al.* // Instr. Exp. Techn. 2013. V. 56. № 6. P. 680.
6. *Burdovitsin V.A., Klimov A.S., Medovnik A.V. et al.* // Plasma Sources Sci. Technol. 2010. V. 19. Art. № 055003.
7. *Bakeev I.Yu., Klimov A.S., Oks E.M. et al.* // J. Phys. Conf. Ser. 2018. V. 1115. Art. № 032001.
8. *Bakeev I., Klimov A., Oks E. et al.* // Plasma Sources Sci. Technol. 2018. V. 27. № 7. Art. № 075002.
9. *Bakeev I.Yu., Klimov A.S., Oks E.M. et al.* // Rev. Sci. Instr. 2019. V. 90. Art. № 023302.
10. *Kaur A., Ribton C., Balachandaran W.* // J. Mater. Proc. Techn. 2015. V. 221. P. 225.
11. *Зенин А.А., Климов А.С., Николаенко А.Н.* // Докл. ТУСУР. 2017. Т. 20. № 2. С. 40.
12. *Burdovitsin V., Oks E.* // Rev. Sci. Instr. 1999. V. 70. № 7. P. 2975.
13. *Burdovitsin V.A., Kazakov A.V., Medovnik A.V. et al.* // Phys. Plasmas. 2017. V. 24. № 9. Art. № 093109.