

УДК 537.533

И.Ю. Бакеев, А.С. Климов

## Влияние формы ускоряющего электрода в форвакуумном плазменном источнике на предельные параметры фокусировки электронного пучка

Представлены результаты исследования влияния формы экстрактора на диаметр электронного пучка, генерируемого форвакуумным плазменным источником электронов. Показано, что наименьший диаметр пучка обеспечивается экстрактором, имеющим минимально возможный диаметр отверстия. Это может быть связано как с меньшим провисанием ускоряющего поля в область за экстрактором, так и локальным увеличением напряженности электрического поля вблизи эмиссионного отверстия.

**Ключевые слова:** остророфокусированный электронный пучок, плазменный источник электронов, форвакуум, диаметр пучка, электрическое поле.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2018-21-1-47-51

К настоящему времени электронно-пучковые технологии находят широкое применение для различного рода обработки материалов [1, 2], среди которых резка, сварка, испарение, наплавка. Традиционно такие технологии осуществляют при давлениях менее 0,1 паскаля, поскольку процессы эмиссии электронов как из твердотельных [3], так и из плазменных катодов [4], а также закономерности ускорения и формирования пучка при этих давлениях достаточно хорошо изучены. При этом улучшение качества прецизионной обработки, связанное с повышением плотности мощности электронного пучка, осуществляется путем уменьшения его поперечных размеров.

Ярким примером источников пучков малого диаметра являются пушки Пирса со сходящимся потоком [5], в которых достижение высокой плотности тока в первую очередь обеспечивается формой электродов: выгнутым сферическим эквипотенциальным термокатодом и анодом с отверстием, размер которого меньше размеров эмитирующей электроны поверхности катода. Ввиду низкой температуры эмитированных электронов диаметр генерируемых такими источниками пучков может варьироваться вплоть до нескольких нанометров (установки для электронно-лучевой литографии [6]).

Наряду с термокатодными источниками весьма распространены источники электронов с плазменным катодом [7], которые ввиду высокой температуры эмитированных электронов в несколько электрон-вольт обеспечивают генерацию пучков с диаметром вплоть до 100 микрометров. Ключевой особенностью фокусировки электронов в таких источниках является изменение положения эмиссионной границы плазмы в зависимости от ее концентрации и напряженности электрического поля в эмиссионном канале [8]. Так, при низкой концентрации плазмы и высокой напряженности электрического поля эмитирующая поверхность плазмы выгибается в разрядную область, за счет чего обеспечивается фокусировка электронного пучка. В случае слабого электрического поля и высокой концентрации эмис-

сионная плазма провисает в ускоряющий промежуток, тем самым изначально формируя расходящийся пучок.

Интерес к электронно-лучевой обработке диэлектриков обусловил развитие форвакуумных источников электронов [9, 10], функционирующих при давлениях от единиц до сотни паскалей. Способность таких источников к эффективной обработке диэлектриков без применения дополнительных средств компенсации отрицательного заряда на обрабатываемой поверхности связана с образованием потока ионов из плазмы, генерируемой за счет ионизации рабочего газа электронами пучка, а также плазмы разряда между обрабатываемой поверхностью и стенками вакуумной камеры. Поток ионов из плазмы, устремляющийся на обрабатываемую поверхность, частично нейтрализует накопленный отрицательный заряд, благодаря чему потенциал диэлектрической мишени становится значительно меньше ускоряющего напряжения.

Образование пучковой плазмы в области пространства пучка может накладывать свои особенности на формирование электронного пучка в ускоряющем промежутке. Так, в работе [11] при давлении газа 30 Па был обнаружен эффект уменьшения диаметра пучка по мере увеличения его тока. В то же время авторами [8] показано, что повышение концентрации эмиссионной плазмы и вследствие этого ее провисание в ускоряющий промежуток должно приводить к обратному эффекту. Возможная причина этого рассмотрена в [11] и состоит в проникновении пучковой плазмы в ускоряющий промежуток. Один из способов экспериментальной проверки данного предположения состоит в измерении размеров пучка при изменении формы экстрактора, обеспечивающем такое же перераспределение электрического поля, как и проникновение пучковой плазмы.

Цель данной работы состояла в экспериментальном исследовании влияния формы ускоряющего электрода в форвакуумном плазменном источнике электронов на геометрические размеры пучка в фокальной плоскости.

### Схема экспериментальной установки и методика эксперимента

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Для генерации электронного пучка *1* использовался форвакуумный плазменный источник электронов *2*, который располагался на верхнем фланце вакуумной камеры *3*. Откачка вакуумной камеры осуществлялась форвакуумным насосом, давление в вакуумной камере регулировалось путем непосредственного напуска рабочего газа (гелия) в вакуумную камеру и составляло 30 Па.

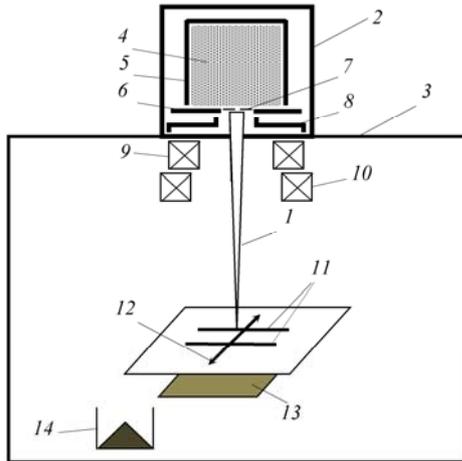


Рис. 1. Схема экспериментальной установки и методики проведения эксперимента: *1* – электронный пучок; *2* – форвакуумный плазменный источник; *3* – вакуумная камера; *4* – эмиссионная плазма; *5* – полый катод; *6* – анод; *7* – перфорированный электрод; *8* – экстрактор; *9* – фокусирующая магнитная катушка; *10* – отклоняющая магнитная катушка; *11* – пара измерительных щелей; *12* – направление развертки пучка; *13* – токоприемный коллектор; *14* – цилиндр Фарадея

Подробное описание конструкции форвакуумного источника электронов и принципа работы изложено в [12]. Эмиссионная плазма *4* создавалась тлеющим разрядом, зажигаемым между полым катодом *5* и анодом *6*. Для извлечения электронов из плазмы в аноде было выполнено эмиссионное окно, перекрытое перфорированным электродом *7* с центральным эмиссионным отверстием диаметром 0,75 мм. Ускорение электронов осуществлялось ускорением в поле, образующимся при приложении высокого напряжения между анодом и экстрактором *8*. Изменение распределения электрического поля в ускоряющем промежутке обеспечивалось установкой в ускоряющий электрод вставок с центральным отверстием, диаметр которого варьировался в пределах 4–15 мм (минимальный диаметр отверстия в экстракторе ограничен попаданием на него электронного пучка). При этом во всех экспериментах расстояние между анодом и поверхностью экстрактора фиксировалось на уровне 13 мм. Дальнейшая фокусировка и отклонение электронного пучка производились двумя магнитными катушками *9* и *10*.

Измерение диаметра пучка производилось измерительным зондом методом «отклонения» [13].

Для этого на верхней заземленной пластине зонда изготавливались две параллельные друг другу протяженные измерительные щели *11* длиной 5 см и шириной 0,1 мм. Электронный пучок разворачивался в линию *12* на поверхности зонда перпендикулярно измерительным щелям. При пересечении движущимся с постоянной скоростью электронным пучком щелей часть электронов попадала на токоприемный коллектор *13*. Точковый сигнал фиксировался с помощью осциллографа и представлял собой два пика с шириной на полувысоте  $\tau$  и расстоянием между пиками  $T$ . Диаметр пучка оценивался по величине произведения ширины пика  $\tau$  на расстояние между щелями, деленной на расстояние между пиками. Ток пучка измерялся цилиндром Фарадея *14* и в экспериментах составлял 15 мА.

Численная оценка распределений электрического поля производилась для цилиндрической системы координат. Это осуществлялось путем решения методом конечных разностей уравнения Пуассона, которое без учета пространственного заряда электронного пучка имеет вид

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0, \quad (1)$$

где  $\varphi$  – электростатический потенциал;  $z$  и  $r$  – аксиальная и радиальная координата соответственно. Размер ячеек при разбиении области ускоряющего промежутка составлял 100 мкм. Граничными условиями принимались: потенциал экстрактора и стенок вакуумной камеры и источника принимался равным 0 В; потенциал анода – –20 кВ.

### Результаты эксперимента

Полученные в ходе эксперимента зависимости диаметра пучка от ускоряющего напряжения при различных диаметрах отверстия в экстракторе представлены на рис. 2.

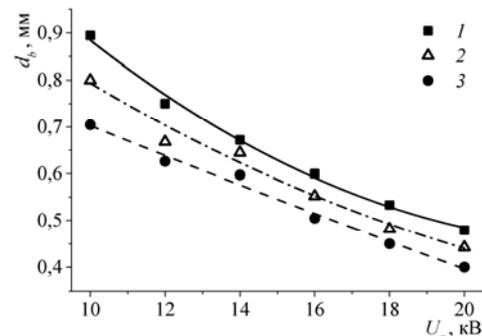


Рис. 2. Зависимости диаметра пучка  $d_b$  от ускоряющего напряжения  $U_a$  при различных диаметрах отверстия в экстракторе  $D$ : *1* –  $D = 15$  мм; *2* –  $D = 8$  мм; *3* –  $D = 4$  мм

Значительное уменьшение диаметра по мере увеличения ускоряющего напряжения может быть связано как с выгибанием плазменной границы в разрядную область [8], так и с особенностью формирования электронного пучка при повышенных давлениях форвакуумного диапазона. По мере увеличения энергии электронов уменьшается сечение их рассеяния на молекулах рабочего газа, что приво-

дит к уменьшению частоты их взаимодействия и тем самым к их отклонению на меньшие углы [11]. Также из полученных результатов видно, что уменьшение диаметра отверстия в экстракторе с 15 до 4 мм приводит к уменьшению диаметра пучка на 20%: при ускоряющем напряжении 20 кВ диаметр уменьшается с 0,5 до 0,4 мм; при ускоряющем напряжении 10 кВ – с 0,9 до 0,7 мм.

Более подробно влияние формы экстрактора на формирование электронного пучка демонстрируют расчетные распределения электрического поля в ускоряющем промежутке, представленные на рис. 3 для различных диаметров отверстий в экстракторе. При диаметре отверстия в экстракторе  $D = 15$  мм (см. рис. 3, *a*) ускоряющее электрическое поле значительно проникает в заэкстракторную область: эквипотенциальная линия, соответствующая потенциалу  $\varphi = -200$  В (наиболее близкая к экстрактору на рис. 3, *a*) на оси симметрии источника, «провисает» за экстрактор практически на длину ускоряющего промежутка. Это в свою очередь влечет за собой появление радиальной составляющей вектора напряженности электрического поля даже вблизи оси источника, что, по-видимому, и приводит к расфокусировке электронного пучка.

При диаметре отверстия в экстракторе  $D = 4$  мм (см. рис. 3, *б*) ускоряющее поле проникает за экстрактор значительно меньше. Благодаря этому силовые линии имеют радиальную составляющую лишь вблизи экстрактора, что практически не приводит к расхождению пучка.

Кроме того, уменьшение эффекта «провисания» электрического поля за экстрактор приводит к увеличению напряженности поля на оси системы, в том числе вблизи эмиссионного отверстия. Так, к примеру, эквипотенциальная линия  $\varphi = -10$  кВ при малом отверстии в экстракторе (см. рис. 3, *б*) более выгнута к аноду по сравнению со случаем большого отверстия (см. рис. 3, *a*): эквипотенциальная линия  $\varphi = -10$  кВ на рис. 3 *a* располагается на расстоянии 7 мм от эмиссионного отверстия, в то время как на рис. 3, *б* – на 6 мм. Увеличение напряженности вблизи эмиссионного отверстия может в свою очередь приводить к двум эффектам, ответственным за уменьшение диаметра пучка. Во-первых, смещение границы эмиссионной плазмы в разрядную область и тем самым изначальное формирование более сфокусированного пучка.

Так как наибольшее сечение рассеяние электронов на молекулах газа приходится на интервал энергий 50–500 эВ, второй эффект заключается в том, что при ускорении в электрическом поле с большей напряженностью электроны набирают энергию свыше данного интервала за меньший пройденный путь, благодаря чему снижается количество актов рассеяния. Так как средняя длина свободного пробега электрона при повышенных давлениях форвакуумного диапазона для указанного диапазона энергий может составлять несколько миллиметров, последний эффект также может играть значительную роль.

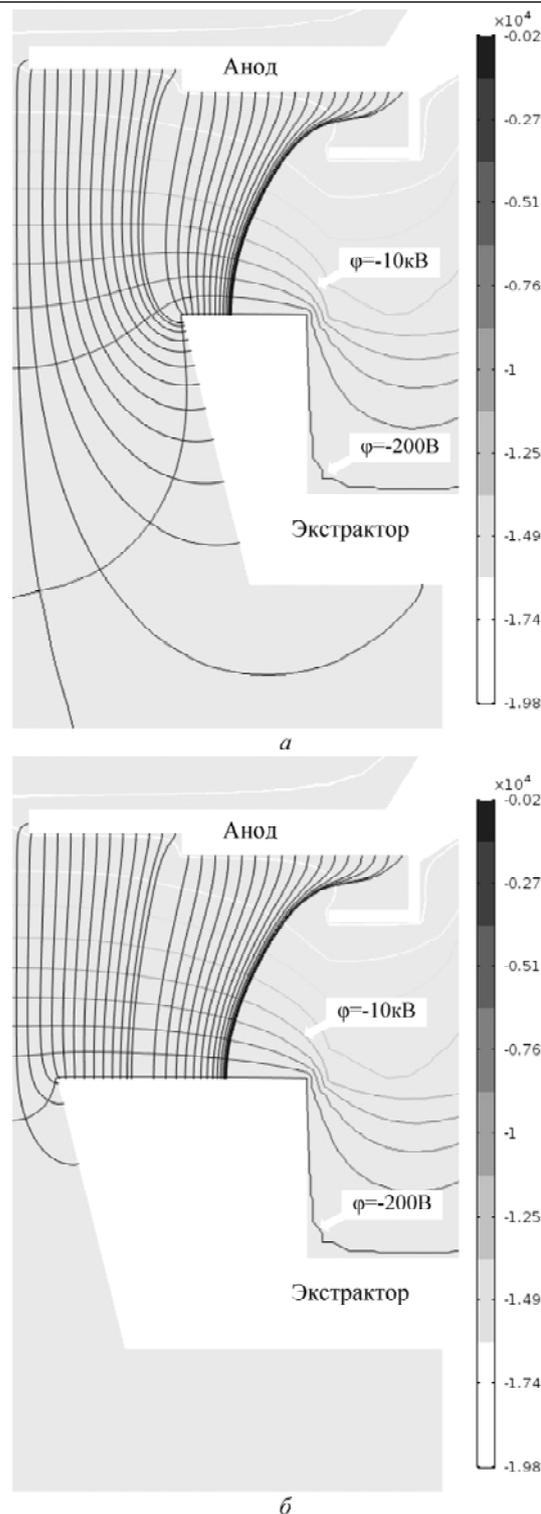


Рис. 3. Распределение электрического поля в ускоряющем промежутке для различных диаметров  $D$  отверстий в экстракторе: *a* –  $D = 15$  мм; *б* –  $D = 4$  мм; вертикальные линии – силовые линии поля; горизонтальные с градиентным цветом – эквипотенциальные линии поля

Таким образом, экспериментальные результаты и расчетные распределения ускоряющего поля свидетельствуют о существенном влиянии распределения электрического поля вблизи экстрактора на процессы формирования электронного пучка. Проникновение пучковой плазмы в ускоряющий промежу-

ток может влиять на распределение электрического поля таким же образом. Как показано в [14, 15], потенциал пучковой плазмы составляет от 5 до 10 В. Таким образом, граница пучковой плазмы вблизи экстрактора образует соответствующую потенциалу плазмы эквипотенциальную линию. В случае повышения концентрации плазмы ее проникновение в область ускоряющего промежутка вызывает выгибание данной эквипотенциальной линии в сторону анода. Ввиду этого результаты данной работы можно считать косвенным доказательством предположения об эффекте проникновения пучковой плазмы в ускоряющий промежуток как об ответственном за уменьшение диаметра электронного пучка по мере увеличения тока пучка.

#### Заключение

В работе представлены экспериментально полученные зависимости диаметра пучка от ускоряющего напряжения при различных диаметрах отверстия в экстракторе. Показано, что уменьшение диаметра отверстия в экстракторе приводит к улучшению фокусировки электронного пучка. При помощи расчетных распределений ускоряющего поля показано, что это связано с меньшим провисанием ускоряющего поля за экстрактор и благодаря этому уменьшением радиальной составляющей электрического поля и увеличением напряженности на оси источника, в особенности вблизи эмиссионного отверстия. Приведенные результаты объясняют механизм уменьшения диаметра пучка по мере увеличения его тока, обнаруженного при исследовании процессов генерации узкофокусированного электронного пучка плазменным источником в области повышенных давлений форвакуумного диапазона.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-08-00239 а.

#### Литература

1. Шиллер З. Электронно-лучевая технология / З. Шиллер, У. Гайзиг, З. Панцер. – М.: Энергия, 1980. – 528 с.
2. Nanofabrication using focused ion and electron beams: principles and applications / I. Utke, S. Moshkalev, P. Russell et al. – Oxford: Oxford University Press, 2012. – 840 p.
3. Коваль Н.Н. Эмиссионная электроника / Н.Н. Коваль, Е.М. Окс, Ю.С. Протасов. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 596 с.
4. Окс Е.М. Источники электронов с плазменным катодом: физика, техника, применения. – Томск: НТЛ, 2005. – 216 с.
5. Дж.Р. Пирс. Теория и расчет электронных пучков. – М.: Мир, 1986. – 217 с.
6. Chou S.Y. Imprint lithography with 25-nanometer resolution / S.Y. Chou, P.R. Krauss, P.J. Renstrom // Science. – 1996. – Vol. 272, No. 5258. – С. 85.
7. Источники электронов с плазменным эмиттером: сб. статей / под ред. Ю.Е. Крейнделя. – Новосибирск: Наука, 1983. – 120 с.
8. Плазменные процессы в технологических электронных пушках / М.А. Завьялов, Ю.Е. Крейнделя, А.А. Новиков, Л.П. Шантурин. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 256 с.
9. Форвакуумные плазменные источники электронов / В.А. Бурдовицин, А.С. Климов, А.В. Медовник, Е.М. Окс, Ю.Г. Юшков. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2014. – 288 с.
10. Generating stationary electron beams by a forevacuum plasma source at pressures up to 100 Pa / A.A. Zenin, A.S. Klimov, V.A. Burdovitsin, E.M. Oks // Technical Physics Letters. – 2013. – Vol. 39, No. 5. – P. 454.
11. Electron beam focusing features in a plasma electron source under forevacuum pressures / A.A. Zenin, I.Yu. Bakeev, Yu.A. Burachevsky et al. // Technical Physics Letters. – 2016. – Vol. 42, No. 7. – P. 712–714.
12. A plasma-cathode electron source for focused-beam generation in the fore-pump pressure range / V.A. Burdovitsin, I.S. Zhirkov, E.M. Oks, I.V. Osipov, M.V. Fedorov // Instruments and Experimental Techniques. – 2005. – Vol. 48, No. 6. – P. 761.
13. Kaur A. Electron beam characterisation methods and devices for welding equipment / A. Kaur, C. Ribton, W. Balachandaran // Journal of materials processing technology. – 2015. – Vol. 221. – P. 225/
14. Золотухин Д.Б. Параметры плазмы, создаваемой электронным пучком в форвакууме / Д.Б. Золотухин, А.С. Климов, А.А. Зенин // Доклады ТУСУР. – 2013. – № 4(30). – С. 79–82.
15. Бакеев И.Ю. Моделирование распространения электронного пучка, генерируемого форвакуумным источником на основе дугового разряда / И.Ю. Бакеев, А.В. Казаков, А.В. Медовник // Доклады ТУСУР. – 2015. – № 4(38). – С. 166–170.

#### Бакеев Илья Юрьевич

Аспирант, мл. науч. сотрудник, лаб. плазменной электроники, каф. физики ТУСУР  
Вершинина ул., д. 74, г. Томск, Россия, 634045  
ORCID <https://orcid.org/0000-0001-6807-3757>  
Тел.: +7-953-923-17-26  
Эл. почта: [bakeeviyu@mail.ru](mailto:bakeeviyu@mail.ru)

#### Климов Александр Сергеевич

Д-р техн. наук, ст. науч. сотрудник, лаб. плазменной электроники, каф. физики ТУСУР  
Вершинина ул., д. 74, г. Томск, Россия, 634045  
ORCID <https://orcid.org/0000-0001-5848-0519>  
Эл. почта: [klimov@main.tusur.ru](mailto:klimov@main.tusur.ru)

Bakeev I.Yu., Klimov A.S.

#### Influence of the shape of accelerating electrode in the forevacuum plasma electron source on the maximal parameters of electron beam focusing

The results devoted to the investigation of the effect of extractor shape on the diameter of electron beam generated by the forevacuum plasma source are presented. It is shown that the smallest diameter of the beam is provided by an extractor having the smallest possible diameter of the hole. It can be due to both a smaller penetration of the accelerating field into the region beyond the extractor, and a local increase in the electric field strength near the emission hole.

**Keywords:** focused beam, plasma source, forevacuum, beam diameter, electric field.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2018-21-1-47-51

## References

1. Shiller Z., Gayzig U., Pancer Z. Electronno-luchevaya tehnologiya [Electron-beam technology]. Moscow, Energy, 1980, 528 p. (In Russ.)
2. Utke I., Moshkalev S., Russell P. et al. Nanofabrication using focused ion and electron beams: principles and applications. Oxford, Oxford University Press, 2012. 840 p.
3. Koval N.N., Oks E.M., Protasov Yu.S. Emissionnaya electronica [Emission electronics]. Moscow, MSTU named after N.E. Bauman, 2009, 596 p. (In Russ.)
4. Oks E.M. Plasma Cathode Electron Sources: Physics, Technology, Applications. Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons, 2006. 171 p.
5. Pierce J. Theory and design of electron beams. New York, Van Nostrand, 1954, 222 p.
6. Chou S.Y., Krauss P.R., Renstrom P.J. Imprint lithography with 25-nanometer resolution. *Science*, 1996, vol. 272, no. 5258, p. 85.
7. Istochniki elektronov s plasmennym katodom [Electron sources with a hollow cathode]. Digest of articles. Under the editorship of Professor Yu.E. Kreindel. Novosibirsk, Science, 1983. 120 p. (In Russ.)
8. Zavyalov M.A., Kreindel Yu.E., Novikov A.A., Shanturin L.P. Plazmennyye process v tekhnologicheskikh elektronnykh puskakh [Plasma processes in technological electron guns]. Moscow, Energatomizdat, 1989. 256 p.
9. Burdovitsin V.A., Klimov A.S., Medovnik A.V., Oks E.M., Yushkov Yu.G. Forvakuumnye plasmennyye istochniki elektronov [Forevacuum plasma electron sources]. Tomsk. Tomsk university publ., 2014, 288 p.
10. Zenin A.A., Klimov A.S., Burdovitsin V.A., Oks E.M. Generating stationary electron beams by a forevacuum plasma source at pressures up to 100 Pa. *Technical Physics Letters*, 2013, vol. 39, no. 5, p. 454.
11. Zenin A.A., Bakeev I.Yu., Burachevsky Yu.A. et al. Electron beam focusing features in a plasma electron source under forevacuum pressures. *Technical Physics Letters*, 2016, vol. 42, no. 7, pp. 712–714.
12. Burdovitsin V.A., Zhirkov I.S., Oks E.M., Osipov I.V., Fedorov M.V. A plasma-cathode electron source for focused-beam generation in the fore-pump pressure. *Instruments and Experimental Techniques*, 2005, vol. 48, no. 6, p. 761.
13. Kaur A., Ribton C., Balachandran W. Electron beam characterisation methods and devices for welding equipment. *Journal of materials processing technology*, 2015, vol. 221, p. 225.
14. Zolotukhin D.B., Klimov A.S., Zenin A.A. Parametry plazmy, sozdavaemoy elektronnyim puchkom v forvakuume [Parameters of plasma generated by electron beam in the forevacuum]. *Doklady TUSURa* [Proceedings of TUSUR University], 2013, vol. 30, no. 4, pp. 79–82 (in Russ.)
15. Bakeev I.Yu., Kazakov A.V., Medovnik A.V. Modelirovanie rasprostraneniya elektronogo puchka, generiruemogo forvakuumnym istochnikom na osnove dugovogo razryada [Modeling distribution of the electron beam generated by the forevacuum source based on the arc discharge]. *Doklady TUSURa TUSURa* [Proceedings of TUSUR University], 2015, vol. 38, no. 4, pp. 166–170.

**Ilya Yu. Bakeev**

PhD student, junior research assistant,  
Laboratory of Plasma Electronics,  
Department of Physics  
74, Vershinin st., Tomsk, Russia, 634045  
ORCID <https://orcid.org/0000-0001-6807-3757>  
Phone: +7-953-923-17-26  
Email: [bakeeviyu@mail.ru](mailto:bakeeviyu@mail.ru)

**Alexander S. Klimov**

Doctor of Technical Sciences, senior research assistant,  
Laboratory of Plasma Electronics,  
Department of Physics  
74, Vershinin st., Tomsk, Russia, 634045  
ORCID <https://orcid.org/0000-0001-5848-0519>  
Email: [klimov@main.tusur.ru](mailto:klimov@main.tusur.ru)