

Характеристики ВЧ катода-нейтрализатора при использовании аргона в качестве рабочего газа

*Д. А. Бондаренко, К. В. Вавилин, С. А. Двинин, И. И. Задириев, Е. А. Кралькина,
И. А. Лобастов, С. Ю. Маринин, А. М. Никонов, М. Ю. Селиванов*

Представлены первые результаты экспериментального исследования характеристик катода-нейтрализатора, рабочий процесс которого основан на индуктивном ВЧ-разряде в аргоне. Рассмотрен диапазон расходов аргона 4–10 см³/мин, диапазон мощностей ВЧ-генератора 35–150 Вт. Показано, что при достижении порогового значения напряжения между коллектором ионов и положительно заряженным относительно коллектора электродом (анодом) наблюдается скачкообразный рост электронного тока.

Ключевые слова: катод-нейтрализатор, индуктивный, высокочастотный, разряд, плазма, ионы, ток электронов.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-3-11-16

Введение

Необходимым элементом земных и космических ионно-пучковых технологий является катод-нейтрализатор [1–4]. Его используют

для компенсации зарядки диэлектрических образцов при их облучении потоком ускоренных ионов в технологиях поверхностной модификации материалов, напыления тонких пленок с ионным стимулированием и т. д. В космосе катод-нейтрализатор позволяет компенсировать зарядку космических аппаратов (КА), возникающую в результате ухода потока ускоренных ионов из двигателя в космическое пространство.

В земных технологиях для нейтрализации потока ионов используют накальные или дуговые полые катоды. В космосе большинство двигательных установок оснащено дуговыми полыми катодами [1]. Основным недостатком, как накальных, так и дуговых полых катодов является ограниченность их времени жизни (срока активного существования). В связи с этим, в работах [6–18] в качестве альтернативы полному дуговому катоду были предложены модели, основанные на безэлектродных разрядах, предположительно обладающих более продолжительным сроком службы [5–14]. В качестве рабочего процесса безэлектродных катодов были рассмотрены емкостной [12], индуктивный [5–11] и геликонный [13] ВЧ-разряды, микроволновый (ЭЦР) разряд [14, 15]. В качестве рабочего га-

Бондаренко Дмитрий Алексеевич¹, инженер.

E-mail: i@dbondarenko.ru

Вавилин Константин Викторович², вед. инженер, к.ф.-м.н.

E-mail: viline@inbox.ru

Двинин Сергей Александрович², доцент, д.ф.-м.н.

Задириев Илья Игоревич², инженер, к.ф.-м.н.

Кралькина Елена Александровна², в.н.с., д.ф.-м.н.

E-mail: ekralkina@mail.ru

Лобастов Игорь Алексеевич³, инженер.

E-mail: lobastov@kerc.msk.ru

Маринин Сергей Юрьевич¹, нач. сектора.

Никонов Александр Михайлович², физик, к.ф.-м.н.

Селиванов Михаил Юрьевич³, в.н.с., к.т.н.

E-mail: Michael.selivanov@gmail.com

¹ АО «Корпорация «ВНИИЭМ».

Россия, 107078, Москва, Хоромный тупик, 4, стр. 1.

² Физический факультет МГУ.

Россия, 111991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2.

³ АО ГНЦ «Центр Келдыша».

Россия, 125438, Москва, Онежская улица, 8.

Статья поступила в редакцию 04 марта 2022 г.

© Бондаренко Д. А., Вавилин К. В., Двинин С. А., Задириев И. И., Кралькина Е. А., Лобастов И. А., Маринин С. Ю., Никонов А. М., Селиванов М. Ю., 2022

за в большинстве работ использовался инертный газ – ксенон, обладающий низким потенциалом ионизации и высоким сечением ионизации, и являющийся рабочим газом ионных и холловских двигателей.

Испытания катодов, основанных на различных модификациях газового разряда, показали, что энергозатраты на получение тока электронов в модели катода на емкостном ВЧ-разряде существенно выше соответствующей характеристики ВЧ-катода на индуктивном ВЧ и микроволновых разрядах. Микроволновый разряд требует создания в объеме катода сильного магнитного поля, а геликонный разряд возможен в источниках плазмы большого размера. В связи с этим, в большинстве работ [5–11] в качестве рабочего процесса прототипов катода-нейтрализатора рассматривался ВЧ-катод на основе индуктивного ВЧ-разряда.

ВЧ индуктивный катод включает в свой состав газоразрядную камеру (ГРК), в которой возбуждается индуктивный ВЧ-разряд. Внутри ГРК располагается металлический коллектор ионов. Ток электронов, равный току ионов на коллектор, извлекается из катода через отверстие, выполненное в его торцевой поверхности. Ток поступает на металлический электрод, вынесенный за пределы катода и находящийся под положительным потенциалом относительно коллектора. В работах [5–11] проанализировано влияние внешних факторов: геометрических размеров катода и отверстия, мощности ВЧ-генератора и расхода ксенона на величину тока электронов. Получено, что газовая экономичность ВЧ индуктивного катода (отношение тока электронов к потоку атомов ксенона, поступающих в катод, умноженному на заряд электрона) может достигать 11, в то время как энергозатраты на получение 1 А электронного тока составляют величину порядка 100 Вт. Эти величины несколько уступают значениям, характерным для традиционных дуговых полых катодов [10].

В последние годы в литературе активно обсуждаются возможности организации полетов КА на низких околоземных орбитах (НОО) (180–200 км), открывающих перспективы для развития телекоммуникаций, транс-

портных операций и широкого круга научных исследований [16]. Основная проблема полетов на НОО состоит в высоком сопротивлении остаточной атмосферы, приводящем к быстрой потере высоты КА. Выходом из положения является оснащение КА электроракетным двигателем (ЭРД), способным компенсировать потери скорости. Однако расчеты показывают, что запасы топлива, необходимые для долговременной работы КА на высотах 180–200 км, неоправданно велики. В связи с этим в мире интенсивно ведутся работы по созданию устройств забора атмосферных газов (УЗАГ), сопряженных с ЭРД. Поток газов, поступающих в ЭРД из УЗАГ, должен обеспечить создание тяги, необходимой для компенсации сопротивления остаточной атмосферы. Появление в составе рабочего газа примеси химически активных газов делает невозможным использование дугового полого катода. В связи с этим встает вопрос о доработке прототипов безэлектродного катода-нейтрализатора, способного работать в присутствии азота и кислорода, что в свою очередь способно решить и еще одну актуальную проблему, связанную с нехваткой ксенона особой чистоты, используемого в настоящее время в качестве рабочего газа электроракетных двигательных установок. ВЧ-катоды в данном случае имеют важное преимущество, заключающееся в том, что источником электронов в них служит плазма ВЧ-разряда. При этом термоэмиссия и ион-электронная эмиссия, чувствительные к химическому составу эмитирующих поверхностей, для их работоспособности не требуются, а сам ВЧ-катод, таким образом, может функционировать на любом рабочем газе, в котором возможно организовать стабильный ВЧ-разряд. Не смотря на то, что принцип действия ВЧ-катодов позволяет им работать практически на любых химически активных газах, создание катода для работы в присутствии азота и кислорода требует существенной оптимизации конструкции устройства. В настоящей работе представлены результаты первых подготовительных экспериментов по апробации ВЧ индуктивного катода-нейтрализатора, работоспособного на смесях инертных газов с воздухом.

Стоит отметить, что ВЧ индуктивный катод может быть применим для компенсации или нейтрализации потока ионов с различным типам двигателей, такими как: ионный двигатель, стационарный плазменный двигатель, двигатель с анодным слоем и др.

В настоящей работе выполнены первые эксперименты по изучению свойств индуктивного ВЧ-катода. В качестве первого шага рассматривались особенности работы катода-нейтрализатора на аргоне.

Экспериментальная установка и методика измерений

ВЧ катод состоит из цилиндрической газоразрядной камеры (ГРК), ограниченной двумя фланцами. Боковые стенки камеры изготовлены из диэлектрического материала (стекла). Внутренний диаметр камеры составляет 25 мм, длина 70 мм. В объеме ГРК расположен металлический электрод – коллектор ионов. На нижнем фланце камеры расположен газоввод, обеспечивающий подачу рабочего газа в объем катода. В верхнем фланце на его оси выполнено отверстие диаметром 2 мм. На боковой поверхности катода расположен индуктор для возбуждения индуктивного ВЧ-разряда. Катод помещается внутрь соленоида, обеспечивающего генерацию в объеме ГРК магнитного поля индукцией B до 7,5 мТл.

ВЧ-катод (см. рис. 1) помещался в вакуумную камеру объемом $0,8 \text{ м}^3$, откачка которой осуществляется системой форвакуумного и турбомолекулярного насосов. На расстоянии 50 мм от катода располагался металлический электрод – анод.

Для поджига и поддержания индуктивного ВЧ-разряда в объеме ГРК концы индуктора через систему согласования подсоединялись к ВЧ-генератору с рабочей частотой 13,56 МГц и варьируемой мощностью P_{gen} в диапазоне 0–1000 Вт. После поджига разряда между коллектором ионов и анодом подавалось постоянное напряжение. В цепь между электродами включалось балластное сопротивление 100 Ом. Создаваемый катодом электронный ток I_e определялся посредством измерения падения напряжения на балластном сопротивлении с помощью пробника напряжения и цифрового осциллографа.

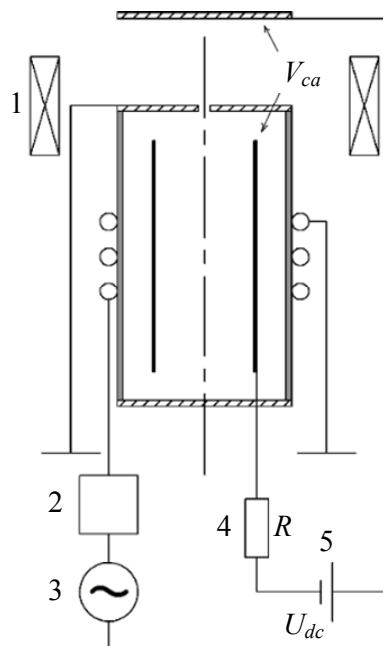


Рис. 1. Схема экспериментального ВЧ-катода и его электрической цепи: 1 – соленоид; 2 – система согласования; 3 – ВЧ-генератор; 4 – балластное сопротивление; 5 – источник постоянного напряжения; U_{dc} – величина напряжения источника 5; V_{ca} – напряжение между коллектором ионов и анодом

В качестве рабочего газа катода использовался аргон с расходом $f_m = 4\text{--}10 \text{ см}^3/\text{мин}$.

Результаты экспериментов

Измерения эффективности вложения ВЧ-мощности η показали, что при условиях экспериментов в плазму вкладывалось 70–80 % мощности ВЧ-генератора. Значения η слабо возрастают с увеличением индукции внешнего магнитного поля B . На рис. 2 показана зависимость тока I_e электронов от B при различных мощностях ВЧ-генератора P_{gen} и расходах аргона f_m . Как видно, ток электронов медленно возрастает с увеличением B . Можно отметить три возможные причины роста электронного тока. Это повышение поглощения ВЧ-мощности плазмой, рост концентрации электронов в катоде за счет уменьшения диффузии электронов поперек магнитного поля, фокусировка потока электронов в зазоре между коллектором ионов и анодом. Дальнейшие эксперименты проводились при значении индукции магнитного поля, равной 4,5 мТл.

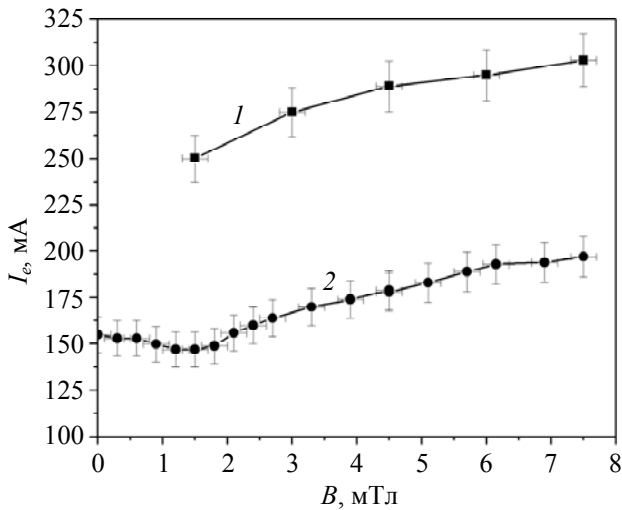


Рис. 2. Зависимость тока электронов от индукции внешнего магнитного поля. Напряжение U_{dc} источника постоянного тока равнялось 60 В: 1 – $P_{gen} = 150$ Вт, $f_m = 10$ см³/мин; 2 – $P_{gen} = 50$ Вт, $f_m = 5$ см³/мин

Эксперименты показали, что в диапазоне 25–150 Вт электронный ток слабо зависит от мощности ВЧ-генератора и возрастает на 20 % с увеличением расхода аргона от 4 до 10 см³/мин. Рассмотрим далее результаты, полученные при изучении зависимости тока электронов от напряжения источника постоянного тока, включенного в цепь между коллектором ионов и анодом. Результаты показаны на рис. 3. Как видно, увеличение напряжения источника постоянного тока U_{dc} сопровождается заметным ростом тока электронов. Напомним, что последовательно с источником постоянного тока в цепь включено балластное сопротивление. Для физических процессов в газоразрядной камере катода имеет значение не напряжение U_{dc} , а напряжение V_{ca} между коллектором ионов и анодом, которое связано с U_{dc} следующим образом:

$$U_{dc} = V_{ca} + RI_e.$$

На рис. 4 показана зависимость тока электронов I_e от напряжения V_{ca} . Как видно, зависимость $I_e(V_{ca})$ имеет несколько характерных участков. При малых напряжениях V_{ca} ток электронов отсутствует, при этом разряд сосредоточен в ГРК катода. Затем в области отверстия возникает область более интенсивного свечения, и появляется электронный ток, который слабо возрастает с увеличением V_{ca} . По достижении напряжения между коллектором ионов и анодом порогового значения (в данном эксперименте 50 В) происходит

резкий рост тока электронов. Аналогичная зависимость была получена в работе [10]. В соответствии с существующей картиной физических процессов в катоде резкий рост тока электронов наблюдается при выполнении двух условий: рядом с коллектором образуется область отрицательного падения потенциалов, достаточная для того, чтобы ток ионов определялся формулой Бома; в области отверстия формируется скачок потенциала, способствующий извлечению электронов из катода [18].

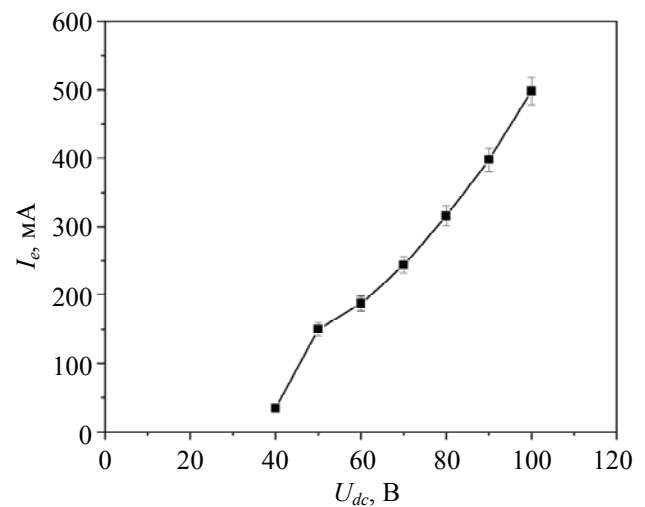


Рис. 3. Зависимость тока электронов от напряжения источника постоянного тока U_{dc} . $P_{gen} = 150$ Вт, $f_m = 5$ см³/мин, $B = 4,5$ мТл

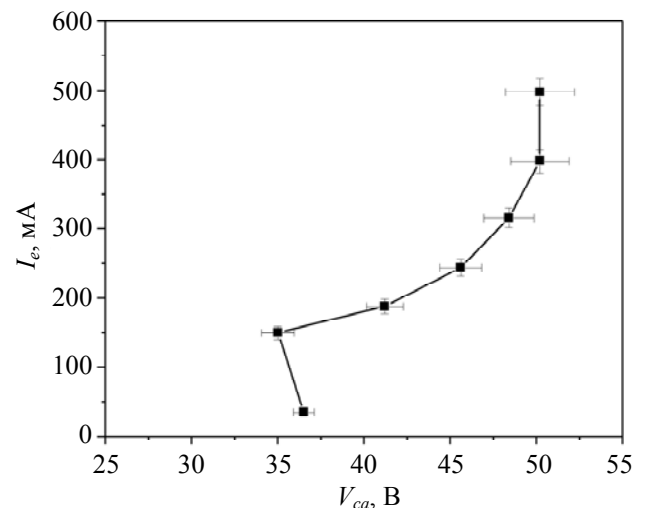


Рис. 4. Зависимость тока электронов от напряжения V_{ca} . $P_{gen} = 150$ Вт, $f_m = 5$ см³/мин, $B = 4,5$ мТл

К сожалению, использованный в работе источник постоянного тока не позволял работать с токами более 500 мА, поэтому величина предельного тока электронов, которая может

быть получена с рассматриваемым катодом, не была достигнута. Тем не менее, полученные значения тока позволяют оценить газовую эффективность катода γ :

$$\gamma = I_e / (ef)$$

и энергозатраты на получение 1 А электронного тока:

$$C_e = V_{ca} + P_{gen} / I_e.$$

Наилучший полученный результат оказался равным: $\gamma = 1,8$ и $C_e = 350$ Вт/А. Из рис. 4 видно, что характеристики катода улучшаются при увеличении извлекаемого тока электронов. Можно ожидать, что дальнейший рост I_e приведет к значительному улучшению достигнутых параметров. Полученные результаты достаточно типичны для ВЧ-катодов, работающих на аргоне. Например, в работе [5], где изучался ВЧ-катод похожей конструкции, указанные величины при схожих ВЧ-мощностях составили: $\gamma = 2,7$ и $C_e = 420$ Вт/А.

Заключение

В работе представлены первые результаты экспериментального исследования характеристик катода-нейтрализатора, рабочий процесс которого основан на индуктивном ВЧ-разряде в аргоне. Рассмотрен диапазон расходов аргона 4–10 см³/мин, диапазон мощностей ВЧ-генератора 35–150 Вт. Показано, что зависимость электронного тока от напряжения между коллектором и анодом V_{ca} имеет несколько характерных участков. При малых напряжениях V_{ca} ток электронов отсутствует, при этом разряд сосредоточен в катоде. При увеличении V_{ca} в области отверстия возникает область более интенсивного свечения, и появляется электронный ток, который слабо возрастает с увеличением V_{ca} . По достижении напряжения между коллектором и анодом порогового значения (в данном эксперименте 50 В) происходит резкий рост тока электронов.

Исследование выполнено при частичной
финансовой поддержке РФФИ в рамках
научного проекта № 21-72-10090.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kaufman H. R., Robinson R. S. Operation of Broad Beam Sources. – Alexandria: Commonwealth Scientific, 1984.
2. Goebel Dan M., Katz Ira. Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters. – California: Jet Propulsion Laboratory, 2008.
3. Горшков О. А., Муравьев В. А., Шагайда А. А., Коротеев А. С. Холловские и ионные плазменные двигатели для космических аппаратов. – М.: Машиностроение, 2008.
4. Mazouffre S. // Plasma Sources Sci. Technol. 2016. Vol. 25. P. 033002.
5. Scholze F., Tartz B. M., Neumann H. // Review of scientific instruments. 2008. Vol. 79. P. 02B724.
6. Jahanbakhsh Sina, Satir Mert, Celik Murat // Review of scientific instruments. 2016. Vol. 87. P. 02B922.
7. Dietz Patrick, Beckery Felix, Keib Konstantin, Holstev Kristof, Klar Peter J. // IEP-2019-207.
8. Scholze Frank, Spemann Daniel, Feili Davar // IEP-2019-475.
9. Smirnov P., Smirnova M., Schein J., Khartov S. // IEP-2019-840.
10. Hatakeyama Tomoyuki, Irie Masatoshi, Watanabe Hiroki, Okutsu Aasami, Aoyagi Junichiro, Takegahara Haruki // IEP-2007-226.
11. Godyak Valery, Raitses Yevgeny, Fisch Nathaniel J. // IEP-2007-266.
12. Weis S., Schartner K. H., Lob H., Feili D. // IEP-2005-086.
13. Longmier B. W., Hershkowitz H. // AIAA Paper 2005-3856, 2005.
14. Hidaka Y., Foster J., Getty W., Gilgenbach R., Lau Y. // J. Vac. Sci. Technol. 2007. Vol. A 25. P. 781.
15. Weatherford B., Foster J., Kamhawi H. // Rev. Sci. Instrum. 2011. Vol. 82. P. 093507.
16. Filatyev A. S., Yanova O. V. // Acta Astronautica. 2019. Vol. 158. P. 23.
17. Kralkina E. A., Rukhadze A. A., Pavlov V. B., Vavilin K. V., Nekliudova P. A., Petrov A. K., Alexandrov A. F. // Plasma Sources Sci.&Technol. 2016. Vol. 25. P. 015016. <https://doi.org/10.1063/1.5023631>.
18. Jahanbakhsh Sina, Celik Murat // 50th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. 2014.

Characteristics of RF cathode-neutralizer using argon as the working gas

*D. A. Bondarenko¹, K. V. Vavilin², S. A. Dvinin², I. I. Zadiriev², E. A. Kralkina²,
I. A. Lobastov³, S. Yu. Marinin¹, A. M. Nikonov², and M. Yu. Selivanov³*

¹VNIIEM Corporatopn JC
Bd. 1, 4 Khoromnyi tupik, Moscow, 107078, Russia
E-mail: i@dbondarenko.ru

²Physical faculty of Lomonosov Moscow State University
Bd 2, 1 Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia

³Keldysh Research Center
8 Onezskaya st., Moscow, 125438, Russia

Received March 04, 2022

The paper presents the first results of an experimental study of the cathode-neutralizer characteristics, the working process of which is based on an inductive RF discharge in argon. The range of argon flow rates is 4–10 cm³/min, the power range of the RF generator is 35–150 W. It is shown that when the threshold voltage between the ion collector and the electrode (anode) positively charged with respect to the collector is reached, an abrupt increase in the electron current is observed.

Keywords: cathode-neutralizer, inductive, radio-frequency, discharge, plasma, ions, electron current.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-3-11-16

REFERENCES

1. H. R. Kaufman and R. S. Robinson, *Operation of Broad Beam Sources* (Alexandria, Commonwealth Scientific, 1984).
2. Dan M. Goebel and Ira Katz, *Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters* (California, Jet Propulsion Laboratory, 2008).
3. O. A. Gorshkov, V. A. Muraviev, A. A. Shagayda, and A. S. Koroteev, *Hall and Ion Plasma Thrusters for Spacecraft* (Moscow, Mashinostroyeniye, 2008) [in Russian].
4. S. Mazouffre, *Plasma Sources Sci. Technol.* **25**, 033002 (2016).
5. F. Scholze, B. M. Tartz, and H. Neumann, *Review of scientific instruments* **79**, 02B724, (2008).
6. Sina Jahanbakhsh, Mert Satir, and Murat Celik, *Review of scientific instruments* **87**, 02B922 (2016).
7. Patrick Dietz, Felix Beckery, Konstantin Keib, Kristof Holstev, and Peter J. Klar, in *Proceedings of International Electric Propulsion Conference* (Vienna, 2019), p. 207.
8. Frank Scholze, Daniel Spemann, and Davar Feili, in *Proceedings of International Electric Propulsion Conference* (Vienna, 2019), p. 475.
9. P. Smirnov, M. Smirnova, J. Schein and S. Khartov, in *Proceedings of International Electric Propulsion Conference* (Vienna, 2019), p. 840.
10. Tomoyuki Hatakeyama, Masatoshi Irie, Hiroki Watanabe, Aasami Okutsu, Junichiro Aoyagi, and Haruki Takegahara, in *Proceedings of International Electric Propulsion Conference* (Florence, 2007), p. 226.
11. Valery Godyak, Yevgeny Raitses, and Nathaniel J. Fisch, in *Proceedings of International Electric Propulsion Conference* (Florence, 2007), p. 266.
12. S. Weis, K. H. Schartner, H. Lob, and D. Feili, in *Proceedings of International Electric Propulsion Conference* (Princeton, 2005), p. 086.
13. B. W. Longmier and N. Hershkowitz, *AIAA Paper* 2005-3856 (2005).
14. Y. Hidaka, J. Foster, W. Getty, R. Gilgenbach, and Y. Lau, *J. Vac. Sci. Technol.* **A25**, 781 (2007).
15. B. Weatherford, J. Foster, and H. Kamhawi, *Rev. Sci. Instrum.* **82**, 093507 (2011).
16. A. S. Filatyev and O. V. Yanova, *Acta Astronautica* **158**, 23 (2019).
17. E. A. Kralkina, A. A. Rukhadze, V. B. Pavlov, K. V. Vavilin, P. A. Nekliudova, A. K. Petrov, and A. F. Alexandrov, *Plasma Sources Sci. Technol.* **25**, 015016 (2016).
18. Sina Jahanbakhsh and Murat Celik, in *Proceedings of 50th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*, (Cleveland, 2014).