

## Комбинация емкостного высокочастотного разряда и разряда постоянного тока для использования в плазменном ускорителе с замкнутым дрейфом электронов.

### Часть I. Вольт-амперная характеристика и импеданс разряда

*И. И. Задириев, Е. А. Кралькина, К. В. Вавилин, Е. В. Швыдкий, А. Ф. Александров*

*Экспериментально исследованы вольт-амперная характеристика и импеданс гибридного разряда, основанного на комбинации емкостного ВЧ-разряда и разряда постоянного тока, в источнике плазмы с геометрией ускорителя с замкнутым дрейфом электронов. Показано, что наличие ВЧ-составляющей приводит к расширению области существования разряда по сравнению с режимом постоянного тока. Наличие постоянного смещения активного электрода сопровождается уменьшением мнимой и ростом действительной частей импеданса разряда.*

*Ключевые слова:* высокочастотный разряд, холловский источник ионов, ускоритель с замкнутым дрейфом электронов.

#### Введение

На настоящий момент ускорители с замкнутым дрейфом электронов находят широкое применение в качестве электрореактивных космических двигателей (т. н. «холловские двигатели») [1–3], а также в качестве источников плазмы в наземных технологиях поверхностной модификации материалов, напыления покрытий, и т. д. [4, 5]. Популярность ускорителей с замкнутым дрейфом электронов является следствием простоты, надёжности их конструкции и работы.

Традиционный рабочий режим ускорителя основан на разряде постоянного тока, организованном в диэлектрическом канале, на выходе из которого создается внешнее магнитное поле с преимущественной радиальной составляющей. Величина магнитного поля соответствует условиям, когда электроны замагничены, а ионы практически не изменяют свои траектории под действием

поля [1]. В области среза канала формируется замкнутый дрейф электронов, увеличивающий время жизни электронов в разряде и сопровождающийся повышением плотности плазмы. Ионы, в свою очередь, ускоряются электрическим полем, существующим в области среза, по направлению из канала, формируя поток ускоренных ионов [1]. Очевидно, что на выходе из ускорителя можно получить лишь те значения пары «энергия ионов – ток пучка», которые попадают на вольт-амперную характеристику (ВАХ) устройства. Это означает невозможность независимого управления плотностью и энергией потока ионов в традиционном рабочем режиме.

В работах [6–8], основываясь на аналогии между разрядом постоянного тока и емкостным ВЧ-разрядом [9], было предложено использовать в качестве рабочего процесса ускорителя высокочастотный (ВЧ) емкостной разряд. Полученные в [6–8] результаты указывают на перспективность подхода. Однако отмеченный выше недостаток ускорителя, работающего на разряде постоянного тока, оказался естественно присущим и новому устройству.

Целью данной работы является рассмотрение возможности использования гибридного разряда, а именно, высокочастотного емкостного разряда и разряда постоянного тока для целей независимого управления энергией и плотностью пучка ионов. Аналогичный вид разряда рассматривался в работе [10] в плоской геометрии и в отсутствии магнитного поля как потенциально применимый в плазменном травлении.

---

**Задириев Илья Игоревич**<sup>1</sup>, инженер, к.ф.-м.н.

**Кралькина Елена Александровна**<sup>1</sup>, вед.н.с., д.ф.-м.н.

**Вавилин Константин Викторович**<sup>1</sup>, вед. инженер, к.ф.-м.н.

**Швыдкий Георгий Вячеславович**<sup>2</sup>, аспирант.

**Александров Андрей Фёдорович**<sup>1</sup>, г.н.с., д.ф.-м.н.

<sup>1</sup> Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова.

Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1.

E-mail: iizadiriiev@gmail.com

<sup>2</sup> Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН.

Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38.

*Статья поступила в редакцию 1 февраля 2018 г.*

В настоящей работе, первой части цикла, представлены результаты, иллюстрирующие влияние постоянной составляющей разряда на зависимость амплитуды ВЧ-тока от ВЧ-напряжения и определяющие импеданс разряда.

### Схема эксперимента

Схема лабораторной модели ускорителя с замкнутым дрейфом электронов изображена на (рис. 1). За основу модели источника плазмы в настоящей работе был взят двигатель СПД-70. Радиус внутренней стенки керамического разрядного канала составлял 2,5 см, внешней – 3,5 см, а его глубина была 3,5 см. Вблизи от газораспределителя в разрядном канале был помещён активный электрод, а в качестве заземлённого электрода выступал заземлённый металлический корпус самого источника плазмы.

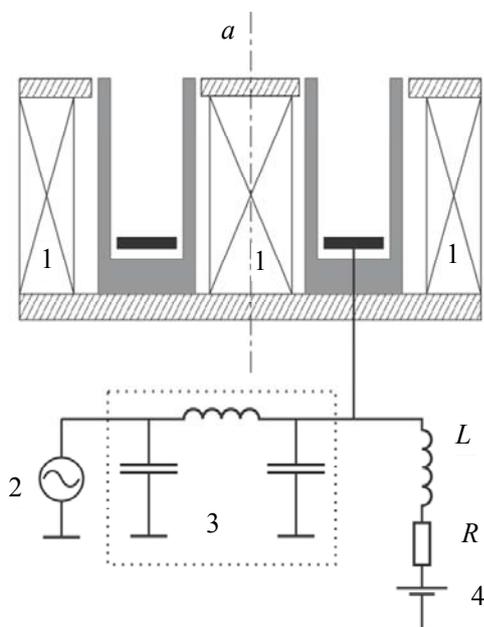


Рис. 1. Схема лабораторного ускорителя и его электрической цепи. Штриховкой обозначены элементы магнитопровода, серым – керамические стенки разрядного канала, чёрным – активный электрод. Другие обозначения: а – ось симметрии, 1 – магнитные катушки, 2 – ВЧ-источник питания, 3 – система согласования, 4 – источник постоянного напряжения.

Необходимо подчеркнуть, что для поддержания емкостного ВЧ-разряда наличие эмитирующего катода-компенсатора не является обязательным, поэтому он не использовался. В отличие от СПД-70, где магнитные катушки включены в цепь последовательно с разрядом, в настоящем эксперименте использовался внешний источник питания электромагнитов, позволявший регулировать величину тока в диапазоне от 0 до 5 А, что соответствует магнитному полю в области среза

разрядного канала 0–500 Гс. Сама же геометрия катушек и магнитопроводов не перетерпела значительных изменений, поэтому профиль радиальной компоненты магнитного поля вдоль разрядного канала остался таким же, как и у СПД-70.

ВЧ-напряжение от генератора Cesarg через систему согласования подавалось между активным электродом и заземленным корпусом источника плазмы, электрически соединенным со стенками вакуумной камеры. Дополнительно к ВЧ-напряжению на активный электрод подводилось положительное постоянное смещение относительно земли. Для этого между активным электродом и корпусом источника плазмы включался источник постоянного тока.

В ходе эксперимента регистрировались ВЧ-напряжение и ток на разряде с помощью делителя напряжения и пояса Роговского соответственно, сигналы с которых подавались на двухканальный осциллограф. Также встроенными в источник постоянного тока амперметром и вольтметром снималась ВАХ в цепи постоянного тока.

В качестве рабочего газа использовался ксенон. Исследовались параметры разряда в диапазоне подводимых к нему ВЧ-мощностей до 200 Вт, постоянных смещений 0–500 В и расходов рабочего газа 5–10 мл/мин. Остаточное давление в вакуумной камере при указанных расходах газа составляло величину  $(2-4) \times 10^{-4}$  Торр.

### Результаты экспериментов

Эксперименты показали, что поджиг и горение разряда с использованием только источника постоянного тока при рассмотренных условиях экспериментов невозможны. Однако при тех же условиях чисто емкостной разряд легко поджигался и горел. При индукции магнитного поля  $B$  менее 40 Гс разряд заполнял всю вакуумную камеру. По мере роста магнитного поля увеличивалась интенсивность свечения разряда вблизи источника плазмы, и при  $B > 100$  Гс разряд концентрировался в разрядном канале, принимая вид кольца, расположенного вблизи среза канала. Подача постоянного смещения на активный электрод одновременно с ВЧ-напряжением приводила к увеличению размера струи на выходе из модели по сравнению с чисто емкостным разрядом.

Рассмотрим вольт-амперные характеристики (ВАХ) разряда, полученные на основании измерения зависимости ВЧ-тока от приложенного ВЧ-напряжения. На рис. 2 показана зависимость ВЧ-тока, текущего через разряд, от ВЧ-напряжения, приложенного к разряду при отсутствии постоянного смещения активного электрода. Разность фаз между током и напряжением  $\Delta\varphi$  в рассмотренном диапазоне параметров составляла величину по-

рядка  $75^\circ$  (см. рис. 3). В отсутствие постоянного смещения  $\Delta\phi$  имеет значение около  $80^\circ$ , то есть разрядный промежуток замыкается в основном током смещения. Появление постоянного смещения  $U_0$  на активном электроде, как следует из рис. 3, сопровождается снижением разности фаз между ВЧ-током и напряжением. Так, при  $U_0 = 370$  В разность фаз составляет  $55^\circ$ . Таким образом, с увеличением  $U_0$  возрастает роль тока проводимости. Уменьшение сдвига фаз между ВЧ-током и напряжением приводит к понижению значений

амплитуды тока и напряжения, реализующихся при тех же значениях мощности ВЧ-генератора, что и в чисто емкостном разряде без постоянного смещения (см. рис. 2 и 3). Так, амплитуда ВЧ-составляющей разрядного напряжения  $U_{rf}$  при подаче постоянного смещения на активный электрод уменьшается на величину, близкую к  $U_0$  (рис. 3). Полный ВЧ-ток падает, однако, как показывают вычисления, активная составляющая тока, напротив, возрастает при увеличении  $U_0$ . Это свидетельствует об увеличении концентрации плазмы.

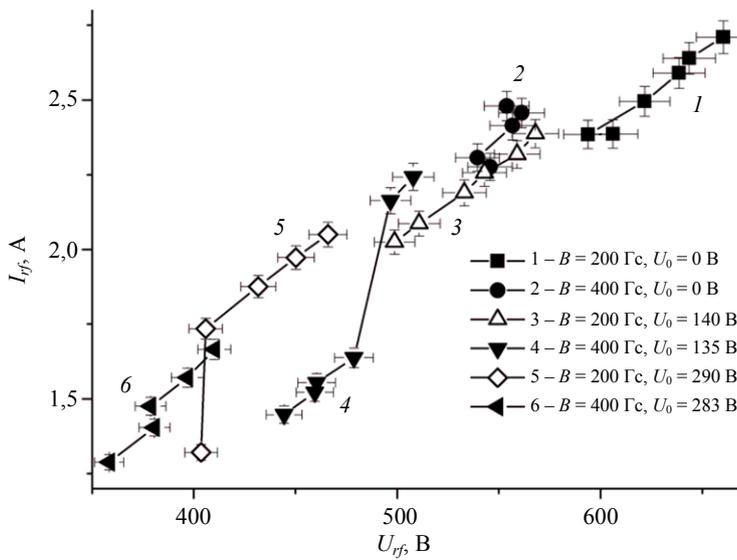


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики разряда в диапазоне ВЧ-мощностей от 100 до 200 Вт при различных значениях магнитного поля  $B$  на срезе разрядного канала и постоянного смещения  $U_0$  на активном электроде. Расход ксенона 5 мл/мин.  $U_{rf}$  – амплитуда ВЧ-напряжения,  $I_{rf}$  – амплитуда ВЧ-тока.

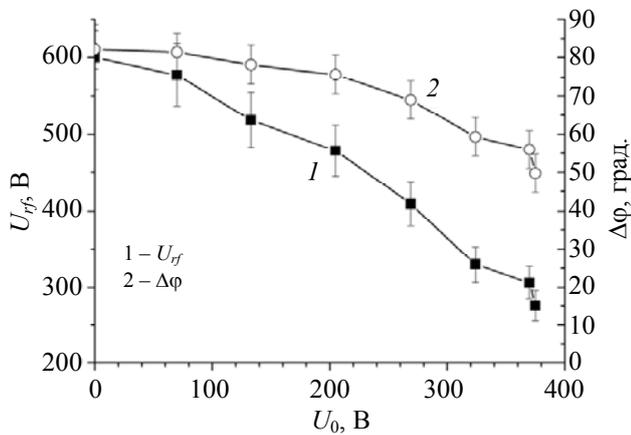


Рис. 3. Зависимость сдвига фаз  $\Delta\phi$  между разрядным напряжением и током и амплитуды разрядного ВЧ-напряжения  $U_{rf}$  от постоянного смещения  $U_0$  на активном электроде. ВЧ-мощность 120 Вт, расход ксенона 5 мл/мин.

Рассмотрим более подробно, как изменяются действительная  $Re(Z)$  и мнимая  $Im(Z)$  части импеданса разряда от постоянного смещения активного электрода. На рис. 4 показана зависимость  $Re(Z)$  и  $Im(Z)$ , соответствующих фиксированной мощности ВЧ-генератора, от величины постоянного смещения активного электрода  $U_0$ . Необходимо

отметить, что действительная часть импеданса составляет величину порядка 50 Ом и более. Эта величина существенно выше активного сопротивления системы согласования (менее 1 Ом). В связи с этим практически вся подводимая к разряду ВЧ-мощность вкладывалась в плазму.

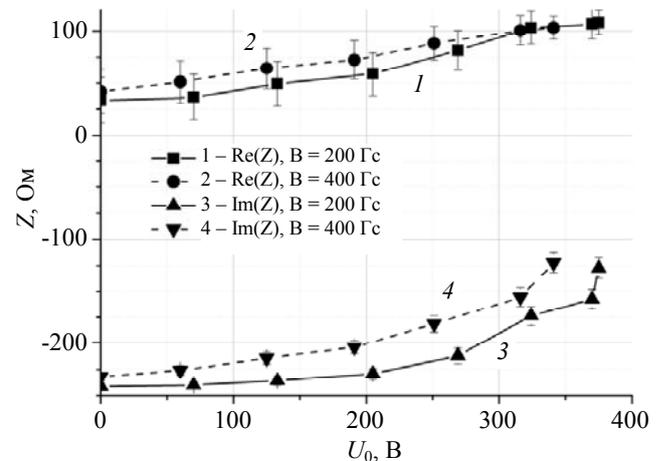


Рис. 4. Зависимость действительной  $Re(Z)$  и мнимой  $Im(Z)$  частей импеданса разряда от постоянного смещения на активном электроде  $U_0$  при различных значениях величины магнитного поля  $B$  на срезе разрядного канала. ВЧ-мощность 120 Вт, расход ксенона 5 мл/мин.

Из рис. 4 видно, что при увеличении  $U_0$  мнимая часть импеданса падает по абсолютной величине, а активная часть растёт, причём зависимость мнимой части импеданса от постоянного смещения имеет нелинейный характер. Качественно данная картина влияния постоянного смещения на импеданс разряда сохраняется при всех рассмотренных мощностях ВЧ-генератора.

Мнимая часть импеданса разряда определяется, главным образом, величиной емкости приэлектродных слоев пространственного заряда. Причиной снижения  $\text{Im}(Z)$  по абсолютной величине при увеличении  $U_0$ , по-видимому, является уменьшение толщины приэлектродных слоев, вызванное ростом концентрации плазмы. Также свой вклад в это снижение может давать рост азимутального дрейфового тока в области радиального магнитного поля, который приводит к росту индуктивности разряда. Действительная часть импеданса разряда определяется сопротивлением плазмы в области азимутального дрейфа электронов, где затруднено их движение вдоль оси разряда. Увеличение  $\text{Re}(Z)$ , по-видимому, связано с расширением области азимутального дрейфа на выходе из источника плазмы, вызванного увеличением падения электрического потенциала на выходе из источника.

Измерения показали, что ток, текущий через цепь разряда постоянного тока, возрастает с увеличением постоянного напряжения, приложенного к разрядному промежутку, и с увеличением мощности ВЧ-генератора. Это свидетельствует о росте концентрации плазмы с увеличением указанных выше величин.

### Заключение

Экспериментально исследованы вольт-амперная характеристика и импеданс гибридного разряда, основанного на комбинации емкостного ВЧ-разряда и разряда постоянного тока, в источнике плазмы с геометрией ускорителя с замкнутым дрейфом электронов. Показано, что наличие ВЧ-составляющей приводит к расширению области существования разряда по сравнению с режимом постоянного тока. Наличие постоянного смещения активного электрода сопровождается

уменьшением мнимой и ростом действительной частей импеданса разряда.

Мнимая часть импеданса разряда определяется, главным образом, величиной емкости приэлектродных слоев потенциала. В связи с этим причиной снижения мнимой части импеданса при увеличении постоянного смещения активного электрода, по-видимому, является уменьшение толщины приэлектродных слоев, вызванное ростом концентрации плазмы. Действительная часть импеданса разряда определяется сопротивлением плазмы в области азимутального дрейфа электронов, где затруднено их движение вдоль оси разряда. Рост действительной части импеданса, вероятно, связан с расширением области азимутального дрейфа на выходе из источника плазмы, вызванного увеличением падения электрического потенциала на выходе из источника.

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ № 16-02-00646А.*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Морозов А. И. Введение в плазмодинамику. – М.: Физматлит, 2006.
2. Ким В. П. // Журнал технической физики. 2015. Т. 85. Вып. 3. С. 45.
3. Гориков О. А., Муравлёв В. А., Шагайда А. А. Холловские и ионные плазменные двигатели для космических аппаратов. – М.: Машиностроение, 2008.
4. Oudini N., Hagelaar G. J. M., Boeuf J.-P., Garrigues L. // J. Appl. Phys. 2011. Vol. 109. No. 7. P. 3310.
5. Zhurin V. V. Optimum Operation of Hall-Current Ion Sources. – Weinheim: Wiley, 2011.
6. Задириев И. И., Рухадзе А. А., Кралькина Е. А., Павлов В. Б., Вавилин К. В., Тараканов В. П. // Журнал технической физики. 2016. Т. 86. Вып. 11. С. 1.
7. Задириев И. И., Рухадзе А. А., Кралькина Е. А., Павлов В. Б., Вавилин К. В. // Прикладная физика. 2015. № 6. С. 57.
8. Задириев И. И. Использование емкостного высокочастотного разряда низкого давления в радиальном магнитном поле для получения ускоренного потока ионов. Диссертация к.физ.-мат.н. – М., МГУ, 2017.
9. Райзер Ю. П., Шнейдер М. Н., Яценко Н. А. Высоочастотный емкостный разряд: Физика. Техника эксперимента. Приложения. – М.: Изд. МФТИ: Наука Физматлит, 1995.
10. Kawamura E., Lieberman M. A., Lichtenberg A. J., Hudson E. A. // J. Vac. Science & Tech. A. 2007. Vol. 25. No. 5. P. 1456.

## Combination of a capacitive high-frequency discharge and a DC discharge for use in a plasma accelerator with a closed electron drift. Part I. Volt-ampere characteristics and discharge impedance

I. I. Zadiriev<sup>1</sup>, E. A. Kralkina<sup>1</sup>, K. V. Vavilin<sup>1</sup>, E. V. Shvidkiy<sup>2</sup>, and A. F. Aleksandrov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University  
1 Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia  
E-mail: iizadiriev@gmail.com

<sup>2</sup>Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences  
38 Vavilov str., Moscow, 119991, Russia

Received February 1, 2018

*Volt-ampere characteristics and impedance of a hybrid DC-RF discharge in geometry of a closed electron drift accelerator are experimentally investigated. It is shown that the presence of a RF current allows the discharge to exist in a wider range of conditions than in the DC-only regime. Increasing the constant voltage bias of an active electrode causes imaginary part of the discharge impedance to decrease, while its real part grows.*

*Keywords:* RF discharge, Hall ion source, closed electron drift accelerator.

### REFERENCES

1. A. I. Morozov, *Introduction to Plasmadynamics* (Fizmatlit, Moscow, 2006) [in Russian].
2. V. P. Kim, *Technical Physics* **85** (3), 45 (2015).
3. O. A. Gorshkov, V. A. Muravlev, and A. A. Shagayda, *Hall and Ion Electric Propulsion for Spacecraft* (Mashinostroyenie, Moscow, 2008) [in Russian].
4. N. Oudini, G. J. M. Hagelaar, J.-P. Boeuf, and L. Garrigues, *J. Appl. Phys.* **109** (7), 3310 (2011).
5. V. V. Zhurin, *Optimum Operation of Hall-Current Ion Sources* (Wiley, Weinheim 2011).
6. I. I. Zadiriev, A. A. Rukhadze, E. A. Kralkina, V. B. Pavlov, K. V. Vavilin, and V. P. Tarakanov, *Technical Physics* **86** (11), 1 (2016).
7. I. I. Zadiriev, A. A. Rukhadze, E. A. Kralkina, V. B. Pavlov, and K. V. Vavilin, *Prikl. Fiz.*, No. 6, 57 (2015).
8. I. I. Zadiriev, *Using of a low-pressure capacitive RF discharge in a radial magnetic field for creation of an accelerated ion flow*. PhD dissertation (Prokhorov General Physics Institute, Moscow, 2017) [in Russian].
9. Y. P. Raizer, M. N. Shneider, and N. A. Yatsenko, *Radio-Frequency Capacitive Discharges* (Nauka Fizmatlit, Moscow, 1995) [in Russian].
10. E. Kawamura, M. A. Lieberman, A. J. Lichtenberg, E. A. Hudson, *J. Vac. Science & Tech. A.* **25** (5), 1456 (2007).