

**Комбинация емкостного высокочастотного разряда
и разряда постоянного тока для использования в плазменном ускорителе
с замкнутым дрейфом электронов.
Часть II. Функции распределения ионов по энергиям**

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

Экспериментально исследованы функции распределения ионов по энергиям на выходе из 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 постоянного смещения активного электрода сопровождается увеличением энергии и плотности ионов на срезе ускорителя. Изменение мощности, вводимой в разряд через ВЧ-канал, и величины постоянного смещения, подводимого к активному электроду через канал постоянного тока, позволяют независимо управлять энергией и плотностью потока ионов.

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 подобных ускорителей является следствием простоты, надёжности их конструкции и работы.

Как отмечалось в [6], одной из проблем разряда является невозможность независимого управления плотностью потока и энергией ионов на выходе из ускорителя. В работах [7–9], принимая во внимание аналогию между разрядом постоянного тока и емкостным ВЧ-разрядом [10], было предложено использовать в качестве рабочего

Швыдкий Г. В., Александров А. Ф., 2018

процесса ускорителя с замкнутым дрейфом электронов высокочастотный емкостной разряд. Полученные в [7–9] результаты указывают на перспективность подхода. Однако отмеченный выше недостаток ускорителя, работающего на разряде постоянного тока, оказался естественно присущим и новому устройству.

В настоящей работе рассмотрена возможность использования гибридного разряда, а именно, высокочастотного емкостного разряда и разряда постоянного тока для целей независимого управления энергией и плотностью пучка ионов. В данной второй части цикла исследований представлены результаты по исследованию функции распределения ионов по энергиям в чисто емкостном разряде, а также в ВЧ-разряде с постоянной составляющей.

Схема эксперимента

Схема лабораторной модели ускорителя с замкнутым дрейфом электронов подробно описана в работах [6, 9]. 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. Необходимо подчеркнуть, что для поддержания емкостного ВЧ-разряда наличие эмитирующего катода-компенсатора не является обязательным, поэтому он не исполь-

Задириев Илья Игоревич¹, инженер, к. ф. - м. н.
 Кралькина Елена Александровна¹, в. н. с., д. ф. - м. н.
 Вавилин Константин Викторович¹, вед. инженер, к. ф. - м. н.
 Швыдкий Георгий Вячеславович², аспирант.
 Александров Андрей Фёдорович¹, г. н. с., д. ф. - м. н.

¹ Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова.

Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1.
 E-mail: iizadiriev@gmail.com

² Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН.
 Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38.

Статья поступила в редакцию 1 февраля 2018 г.

© Задириев И. И., Кралькина Е. А., Вавилин К. В.,

зовался.

Вблизи от газораспределителя в разрядном канале был помещён активный электрод, к которому от ВЧ-источника питания подводилось напряжение частотой 13,56 МГц, а в качестве заземлённого электрода выступал заземлённый металлический корпус самого источника плазмы. Активный электрод подключался к ВЧ-генератору двумя способами. В первом случае схема подключения электрода к ВЧ-генератору обеспечивала разомкнутость разрядной цепи по постоянному току. Эта схема использовалась при исследовании энергетического распределения ионов на выходе из ускорителя, разряд в котором поддерживался только ВЧ-составляющей. Во втором случае цепь активного электрода была замкнута по постоянному току. Соответствующая схема показана на рис. 1. ВЧ-напряжение от генератора Cesar 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.

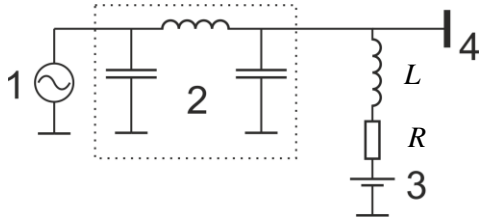


Рис. 1. Электрическая схема подключения активного электрода разряда в случае открытой по постоянному току разрядной цепи: 1 – ВЧ источник питания; 2 – система согласования; 3 – источник постоянного напряжения (напряжения смещения); 4 – активный электрод. L – дроссель (индуктивность около 10 мкГн), R – балластное сопротивление.

Для исследования энергетических распределений ионов использовался четырёхсеточный энергоанализатор [11], расположенный в вакуумной камере на подвижной штанге, позволявшей менять расстояние от энергоанализатора до лабораторного источника ионов в диапазоне 10–40 см, а также угол между осью источника и нормалью к сеткам энергоанализатора от -60 до 60 градусов. Первая сетка была заземлена, на вторую подавалось небольшое отрицательное напряжение (-15 В) для удаления попавших в межсеточное пространство электронов. Третья сетка находилась под задерживающим ионы положительным напряжением, которое можно было менять в широких

пределах (от 0 до 500 В), а на четвертую сетку подавалось малое отрицательное напряжение (в районе -15 В) для компенсации эффекта вторичной ион-электронной эмиссии с коллектора: отрицательное напряжение выталкивало эмитированные электроны обратно на коллектор для того, чтобы измеряемый коллекторный ток был представлен исключительно ионным током. Функция распределения ионов по энергиям определялась однократным дифференцированием кривой задержки [11].

В качестве рабочих газов использовались аргон и 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 для ксенона и 10–15 мл/мин для аргона. Остаточное давление в вакуумной камере при указанных расходах рабочих газов составляло $(2-4) \times 10^{-4}$ Торр.

Результаты экспериментов

Эксперименты показали, что разрядный ток и ток ионного пучка прямо пропорциональны ВЧ-мощности, причем как с постоянным смещением активного электрода, так и без него. Зависимости указанных токов от постоянного смещения нелинейны и имеют вид, изображённый на (рис. 2). При превышении напряжения смещения определённой величины разряд переходил в сильноточную моду (с током более 1,5 А при расходе ксенона 5 мл/мин), которая в рамках данной работы не исследовалась.

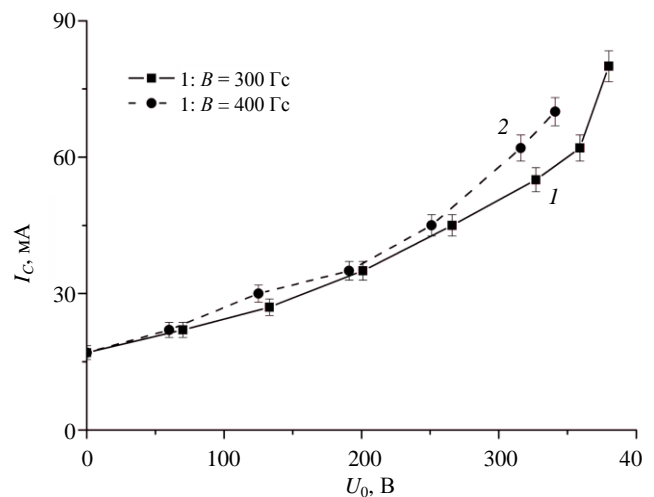


Рис. 2. Зависимость коллекторного тока I_c энергоанализатора от величины постоянного смещения U_0 активного электрода при различных величинах магнитного поля B . I_c пропорционален концентрации ионов на оси пучка. Подводимая к разряду ВЧ-мощность 150 Вт, расход ксенона 10 мл/мин.

Характерный вид полученных энергетических распределений выходящих из разрядного ка-

нала ионов изображён на рис. 3. При использовании схемы подключения разряда к ВЧ-генератору с разрывом цепи по постоянному току средняя энергия ионов составляла величину порядка 70 эВ. При использовании второй схемы подключения разряда к ВЧ-генератору в отсутствие постоянного смещения на активном электроде средняя энергия ионов пучка находилась в диапазоне 250–400 эВ. Значительный рост энергии ионов при использовании второй схемы можно объяснить, приняв во внимание, что площадь заземленного электрода при условиях экспериментов существенно превышала площадь активного электрода. В соответствии с теоретическими выводами [9], при использовании в этом случае разомкнутой по постоянному току схемы подключения разряда среднее за период ВЧ-колебаний падение потенциала у активного электрода существенно выше падения потенциала у заземленного электрода, которое должно быть близко к плавающему потенциалу. В случае замкнутой по постоянному току внешней цепи разряда падения напряжения в слоях у обоих электродов примерно одинаковы. Учитывая то обстоятельство, что энергия выходящих из разрядного канала ионов зависит от потенциала разрядной плазмы относительно заземленного электрода, существенно отличающиеся в случае замкнутой и разомкнутой по постоянному току разрядной цепи, величины падения напряжения в слое около этого электрода должны были привести к пропорциональным различиям в энергиях ионов. Это и наблюдалось в экспериментах.

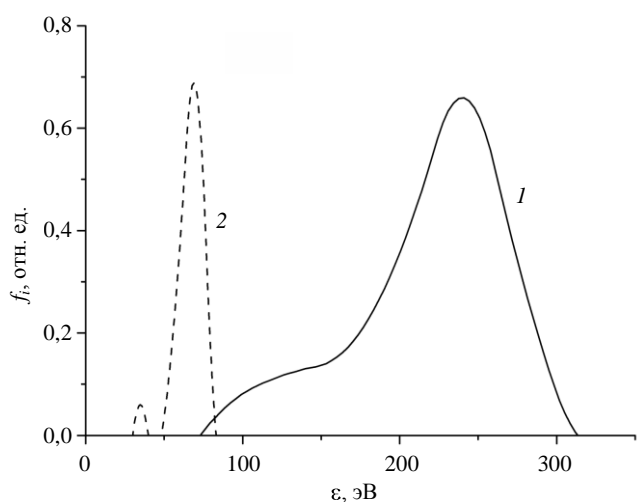


Рис. 3. Вид энергетических распределений f_i выходящих из разрядного канала ионов в случае замкнутой (кривая 1) и разомкнутой (кривая 2) по постоянному току разрядных цепей. ϵ – энергия ионов. Постоянное смещение активного электрода для случая кривой 1 отсутствует. Подводимая к разряду ВЧ-мощность 150 Вт, расход аргона 10 мл/мин, величина магнитного поля на срезе разрядного канала 200 Гс.

Анализ показывает, что указанный выше

диапазон средней энергии ионов соотносится с ВАХ разряда, представленной в [6]. Ионы, покидая разрядную плазму при своём выходе в вакуумную камеру, приобретают энергию, соответствующую среднему за ВЧ-период потенциалу плазмы относительно заземленного электрода. А этот потенциал, в свою очередь, при открытой для постоянного тока разрядной цепи равен половине амплитуды ВЧ-напряжения, подаваемого на разряд.

При подаче постоянного смещения наблюдается рост энергии ионов (см. рис. 4), однако прирост их энергии оказывается меньше величины eU_0 , где U_0 – напряжение смещения относительно заземленного электрода. Причина заключается в том, что постоянное смещение оказывает влияние на ВАХ ВЧ-разряда, приводя к падению реактивной части его импеданса и падению амплитуды ВЧ-напряжения при фиксированной ВЧ-мощности генератора [6], что также отражено на рис. 4. В итоге рост энергии ионов за счёт увеличения постоянного смещения оказывается частично скомпенсирован падением их энергии из-за уменьшения среднего за период ВЧ-колебаний потенциала плазмы относительно земли в разряде.

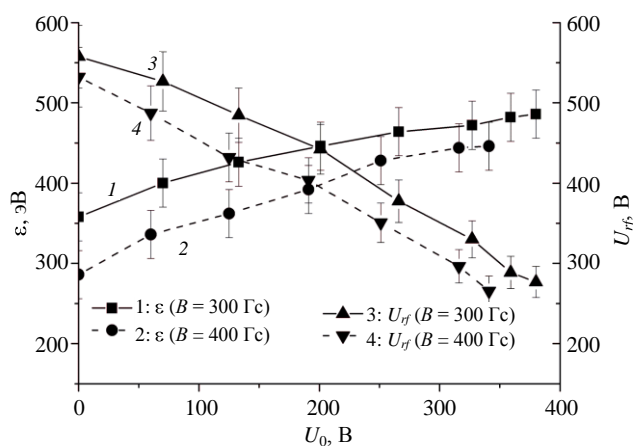


Рис. 4. Зависимость средней энергии ионов пучка ϵ и амплитуды разрядного ВЧ-напряжения U_{rf} от величины постоянного смещения U_0 при фиксированной ВЧ-мощности (120 Вт) и различных величинах индукции B магнитного поля на срезе разрядного канала. Расход ксенона 5 мл/мин.

Суммируя вышеприведённые данные, можно сказать, что плотность ионного потока линейно зависит от ВЧ-мощности и нелинейно от постоянного смещения. Средняя энергия потока ионов пропорциональна постоянному смещению. При этом зависимость энергии ионов от ВЧ-мощности незначительна, так как амплитуда разрядного ВЧ-напряжения с увеличением ВЧ-мощности разряда изменяется слабо [6].

Таким образом, эксперименты показали, что

наличие постоянного смещения активного электрода позволяет контролировать энергию пучка ионов на выходе из источника плазмы, в то время как ВЧ-составляющая разряда позволяет получить разряд при отсутствии эмиссии электронов с катода и при мощностях существенно более низких, чем при только разряде постоянного тока. Изменением мощности, вкладываемой через ВЧ-канал разряда, можно независимо управлять плотностью потока ионов.

Заключение

Экспериментально исследована плотность потока и функция распределения ионов по энергиям в зависимости от параметров гибридного разряда, основанного на комбинации ВЧ-разряда и разряда постоянного тока. Показано, что плотность потока ионов увеличивается пропорционально мощности, вкладываемой через ВЧ-канал. Энергия ионов увеличивается с ростом постоянного смещения активного электрода, однако приращение средней энергии ионов ниже, чем увеличение постоянного смещения электрода. Это связано с изменением импеданса разряда и уменьшением амплитуды ВЧ-напряжения, подводимого к активному электроду, при той же мощности ВЧ-генератора. Зависимость энергии ионов от ВЧ-мощности незначительна. Но использование гибридного разряда позволяет независимо управлять плотностью потока и энергией потока ионов.

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., Кралькина Е. А., Вавилин К. В., Швидкий Е. В., Александров А. Ф. // Прикладная физика. 2018. № 2. С. 10.
7. 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.
8. Задириев И. И., Рухадзе А. А., Кралькина Е. А., Павлов В. Б., Вавилин К. В. // Прикладная физика. 2015. № 6. С. 57.
9. Задириев И. И. Использование емкостного высокочастотного разряда низкого давления в радиальном магнитном поле для получения ускоренного потока ионов: диссертация к. физ.-мат.-наук: 01.04.08. – М., 2017.
10. Райзер Ю. П., Шнейдер М. Н., Яценко Н. А. Высокочастотный емкостный разряд: Физика. Техника эксперимента. Приложения. – М.: изд. МФТИ: Наука Физматлит, 1995.
11. Ghosh S., Chattopadhyay P.K., Ghosh J., Bora D. / Proc. 42nd EPS Conference on Plasma Physics (Lisbon, 2015). P2.172.

PACS: 52.75.Di, 52.80.Pi

Combination of a capacitive high-frequency discharge and a DC discharge for use in a plasma accelerator with a closed electron drift.

Part II. Ion energy distribution functions

I. I. Zadiriev¹, E. A. Kralkina¹, K.V. Vavilin¹, E. V. Shvidkiy², and A. F. Aleksandrov¹

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

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

Received February 1, 2018

Ion energy distribution functions in ion beam produced by combined DC-RF discharge ion source with a geometry of a closed electron drift accelerator are experimentally investigated. It is shown that the presence of constant voltage bias of an active electrode leads to an increase in ion energy and density in

accelerator exit plane. By varying power input through RF channel and voltage bias of an active electrode through DC channel an independent control of ion energy and density can be achieved.

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, E. A. Kralkina, K. V. Vavilin, E. V. Shvidkiy, and A. F. Aleksandrov, *Prikl. Fiz.*, No. 2, 10 (2018).
7. I. I. Zadiriev, A. A. Rukhadze, E. A. Kralkina, V. B. Pavlov, K. V. Vavilin, and V. P. Tarakanov, *Tech. Phys.* **86** (11), 1 (2016).
8. I. I. Zadiriev, A. A. Rukhadze, E. A. Kralkina, V. B. Pavlov, and K. V. Vavilin, *Prikl. Fiz.*, No. 6, 57 (2015).
9. 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).
10. Y. P. Raizer, M. N. Shneider, and N. A. Yatsenko, *Radio-Frequency Capacitive Discharges* (Nauka Fizmatlit, Moscow, 1995).
11. S. Ghosh, P. K. Chattopadhyay, J. Ghosh, and D. Bora in *Proc. 42nd EPS Conference on Plasma Physics* (Lisbon, 2015), P2.172.