

УДК 537.525: 533.9.07: 537.534.2

Влияние внешней цепи на параметры ионного потока, получаемого при помощи емкостного ВЧ-разряда в радиальном магнитном поле

И. И. Задириев, А. А. Рухадзе, Е. А. Кралькина, В. Б. Павлов, К. В. Вавилин

Рассмотрена зависимость характеристик емкостного ВЧ-разряда в геометрии источника плазмы с замкнутым дрейфом электронов от способности внешней электрической цепи пропускать постоянный ток. Приведены энергетические распределения получаемых посредством подобного разряда ионных потоков для случаев замкнутых и разомкнутых по постоянному току электрических цепей, к которым подключён разряд.

PACS: 52.59.Dk, 52.75.Di, 52.80.Pi

Ключевые слова: емкостный ВЧ-разряд, радиальное магнитное поле, холловский ускоритель.

Введение

В работах [1, 2] было показано, что емкостной высокочастотный (ВЧ) разряд в геометрии источника плазмы с замкнутым дрейфом электронов [3] может быть использован для создания ускоренного потока ионов. Это позволяет рассматривать возможность разработки электрореактивного двигателя на основе подобного разряда. Однако в работе [2] не было уделено внимание тому, как влияет электрическая цепь, в которую включён разряд (её для краткости будем называть внешней цепью) на параметры плазмы и, особенно, ионного потока, а все экспериментальные данные были получены лишь для одной единственной произвольно выбранной конфигурации внешней цепи. Для создания полной картины особый интерес представляет сравнение случаев замкнутости и

разомкнутости по постоянному току разрядной электрической цепи, так как при этом можно ожидать существенные различия в характере распределений потенциала в плазме [4, 5], а, следовательно, и различающиеся значения энергий выходящих из плазмы ионов.

На деле большинство генераторов ВЧ-напряжения постоянный ток не пропускают, и для реализации разомкнутой схемы достаточно стандартного последовательного включения «генератор — система согласования — разряд». Получить замкнутую схему можно, включив параллельно с разрядом между его активным электродом и землёй достаточно большую индуктивность (дроссель), так чтобы через неё не шёл сколько-нибудь значительный высокочастотный ток. При таком подключении дросселя исключается батарейный эффект и не происходит постоянного смещения потенциала на активном электроде [6]. Стоит отметить, что вынос электродов за пределы разрядного промежутка эквивалентен последовательному включению с разрядом постоянных емкостей, вследствие чего разряд теряет способность пропускать постоянный ток вне зависимости от конфигурации внешней цепи. Это означает, что в схемах, где генератор и система согласования открыты для прохождения постоянного тока, случаям с наличием и отсутствием дросселя можно сопоставить конфигурации разряда с внутренними и внешними электродами соответственно.

Целью данной работы является экспериментальное сравнение емкостного ВЧ-разряда в радиальном магнитном поле в схеме с дросселем и без него.

Задириев Илья Игоревич, аспирант¹.

Рухадзе Анри Амвросьевич, главный научный сотрудник¹.

Кралькина Елена Александровна, ведущий научный сотрудник².

Павлов Владимир Борисович, старший научный сотрудник².

Вавилин Константин Викторович, научный сотрудник².

E-mail: iizadiriiev@gmail.com

¹ Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38.

² Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова.

Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1.

Статья поступила в редакцию 17 июня 2016 г.

© Задириев И. И., Рухадзе А. А., Кралькина Е. А., Павлов В. Б., Вавилин К. В., 2016

Условия эксперимента

Как и в работе [2], в эксперименте использовалась лабораторная модель источника плазмы на основе СПД-70 (информацию об устройстве и принципе действия можно найти в [3, 7]).

Геометрия разрядного промежутка изображена на рис. 1. Внешний радиус диэлектрического канала составлял 3,5 см, внутренний — 2,5, глубина — 3 см. Магнитное поле в канале имело преимущественно радиальную компоненту с максимумом в области среза канала, где оно задавалось в пределах 50—550 Гс. Подобные параметры обеспечивали замагниченность электронов и незамагниченность ионов в разряде, что является необходимым условием для работы источников плазмы подобного типа [3]. Частота ВЧ-напряжения, подаваемого на активный электрод, составляла 13,56 МГц. В качестве заземлённого электрода выступали стенки вакуумной камеры и металлический корпус самой лабораторной модели источника плазмы. Рабочим газом был криптон, расход которого задавался в диапазоне 0,7—2,1 мг/с, при этом остаточное давление в вакуумной камере было на уровне 0,7 мТорр. Мощность разряда составляла 100—250 Вт.

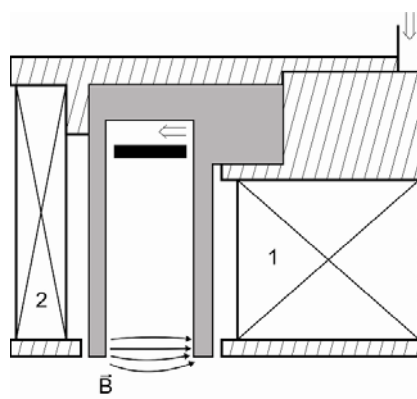


Рис. 1. Схема лабораторного источника плазмы. Штрихпунктирная линия — ось симметрии. Серым обозначены керамические стенки разрядного канала, штриховкой — элементы магнитопровода, чёрным — активный электрод. 1 — внутренняя магнитная катушка, 2 — внешняя. На схеме толстыми стрелками показан поток рабочего газа, а в районе среза разрядного канала отмечено направление силовых линий магнитного поля.

В ходе горения разряда проводились измерения ВАХ и вкладываемой мощности при помощи пояса Роговского и делителя напряжения. Энергетические распределения выходящего из канала ионного потока снимались посредством расположенного на расстоянии 40 см от лабораторного источника плазмы четырёхсеточного энергоанализатора. Для анализа концентрации плазмы использовался ионный ток насыщения на плоские при-

стеночные зонды, расположенные на разной глубине во внешней диэлектрической стенке разрядного канала (как и в работе [8]), а электронная температура оценивалась посредством ВЧ-компенсированного цилиндрического зонда [9], расположенного вне разрядного канала на расстоянии 1,5 см от его среза, где магнитное поле составляло величину порядка 20 Гс. Все измерения дублировались для случаев поджига разряда с дросселем (индуктивностью 12 мкГн) и без него, после чего проводилось их сравнение.

Результаты

Полученные ВАХ имели линейный вид с характерными значениями амплитуды ВЧ-напряжения и модуля импеданса разряда 400—550 В, 180—250 Ом для случая с дросселем и 670—750 В, 240—260 Ом для случая без него. Электронная температура при этом совпала для обоих случаев с точностью до погрешности и была равна $5,5 \pm 0,6$ эВ.

Во всём охваченном экспериментом диапазоне условий концентрация плазмы имела максимум в районе среза разрядного канала, спадая вглубь, а именно, в сторону активного электрода. Характерные величины концентрации в зоне её максимума были равны $(0,6—1,1) \times 10^{11}$ см⁻³ (для мощностей 100—250 Вт соответственно). Температура электронов при этом от мощности разряда практически не зависела и находилась на уровне $5,2 \pm 0,6$ эВ. Причём дросселирование вызвало рост концентрации на 20 %, но никак не повлияло на электронную температуру.

Наибольшая разница между двумя видами подключения разряда обнаружила себя в ионном потоке, создаваемом лабораторным источником, что иллюстрирует рис. 2. Дросселированный разряд давал поток ионов плотностью $(0,5—1,2) \times 10^9$ см⁻³ и энергией на уровне 200 эВ, находившейся в соответствии с амплитудой подаваемого на него ВЧ-напряжения. В то же время поток ионов от разряда без дросселя имел энергии в районе 60—80 эВ и плотности в несколько раз ниже, чем в предыдущем случае, а именно, $(1,0—2,5) \times 10^8$ см⁻³. Таким образом, схема с дросселем показала себя гораздо эффективнее для целей получения ускоренного ионного потока во всём промеренном диапазоне параметров.

Для объяснения полученных результатов стоит, во-первых, заметить, что амплитуда вынужденных колебаний ионов под действием ВЧ-поля пренебрежительно мала, поэтому можно с высокой точностью считать, что средняя энергия частиц в выходящем из разрядного канала потоке ионов соответствует среднему за период потенциалу

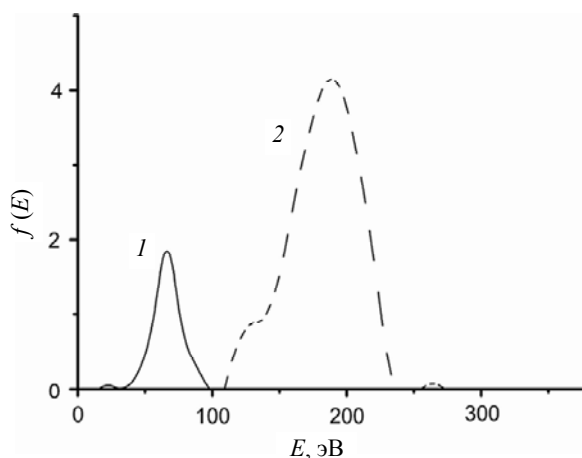


Рис. 2. Энергетическое распределение ионов при наличии дросселя (кривая 2) и при его отсутствии (кривая 1). E — энергия ионов, $f(E)$ — безразмерная функция распределения ионов по энергии, нормированная на полный ионный ток на коллектор энергоанализатора.

плазмы относительно заземлённого электрода, умноженному на элементарный заряд. Этот же потенциал, в свою очередь, можно связать с амплитудой U_0 ВЧ-напряжения, поданного с генератора на активный электрод, при помощи упрощённой модели из [10], в которой разряд представляется в виде двух последовательно соединённых емкостей C_1 и C_2 , соответствующих импедансам слоёв при активном и заземлённом электродах соответственно. Вычисления из [10] дают для среднего потенциала плазмы ϕ_p (за период колебаний ВЧ-поля) следующие оценки: $\phi_p \approx U_0$ для случая с дросселем и $\phi_p \approx U_0 \frac{C_1}{C_1 + C_2}$ для случая без дросселя (или с внешними электродами). Учитывая, что в эксперименте было $C_1 \ll C_2$ в силу того, что площадь активного электрода была мала по сравнению с площадью заземлённого, данные моделью оценки качественно согласуются с результатами эксперимента.

Заключение

Прозрачность внешней электрической цепи по постоянному току оказывает существенное влияние на параметры потока ионов, создаваемого емкостным ВЧ-разрядом в радиальном магнитном поле. При этом плотность разрядной плазмы меняется незначительно. В текущей конструкции лабораторного источника схема включения разряда с дросселем оказывается более эффективной. Однако можно ожидать, что разряд с внешними электродами также применим для получения ионного потока с энергиями порядка сотен эВ при мощностях 100—200 Вт, если площадь активного электрода значительно превосходит площадь заземлённого.

ЛИТЕРАТУРА

1. Задириев И. И., Рухадзе А. А., Кралькина Е. А., Павлов В. Б., Вавилин К. В., Тараканов В. П. // Инженерная физика. 2016. № 2. С. 59.
2. Задириев И. И., Рухадзе А. А., Кралькина Е. А., Павлов В. Б., Вавилин К. В. // Прикладная физика. 2015. № 6. С. 57.
3. Морозов А. И. Введение в плазмодинамику. — М.: Физматлит, 2006.
4. Райзер Ю. П. Физика газового разряда: Учеб. руководство. — М.: Наука, 1987.
5. Савинов В. П. Граничные эффекты емкостного высокочастотного разряда: Дис. ... док. физ.-мат. наук. — М.: 2001.
6. Савинов В. П. / Труды VII конф. по физике газового разряда (Самара. 1994). Т. 1. С. 106–107.
7. Ким В. П. // ЖТФ. 2015. Т. 85. № 3. С. 45.
8. Ким В. П., Скрьльников А. И., Сидоренко Е. К. // Авиационно-космическая техника и технология. 2006. № 10. С. 112.
9. Chen F. F. Lecture Notes on Langmuir Probe Diagnostics, Mini-Course on Plasma Diagnostics. IEEE-ICOPS meeting, Jeju, Korea, June 5, 2003.
10. Райзер Ю. П., Шнейдер М. Н., Яценко Н. А. Высоко-кочастотный емкостный разряд: Физика. Техника эксперимента. Приложения. — М.: Изд-во Моск. физ.-техн. ин-та, 1995.

Influence of an external circuit on the ion beam created by capacitive RF discharge in radial magnetic field

I. I. Zadiriev¹, A. A. Rukhadze¹, E. A. Kralkina², V. B. Pavlov², and K. V. Vavilin²

¹ Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences
38 Vavilov str., Moscow, 119991, Russia

² Lomonosov Moscow State University
GSP-1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia
E-mail: iizadiriev@gmail.com

Received June 17, 2016

Dependence of capacitive RF discharge parameters on driving circuit's ability to pass direct current has been investigated. Energy distributions of ion beams created by this discharge in cases of external circuit being open and closed for direct current are presented.

PACS: 52.59.Dk, 52.75.Di, 52.80.Pi

Keywords: capacitive RF discharge, radial magnetic field, Hall-effect thruster.

REFERENCES

1. I. I. Zadiriev, A. A. Rukhadze, E. A. Kralkina, V. B. Pavlov, and K. V. Vavilin, *Inzhenernaya Fizika*, No. 2, 59 (2016).
2. I. I. Zadiriev, A. A. Rukhadze, E. A. Kralkina, V. B. Pavlov, and K. V. Vavilin, *Prikladnaya Fizika*, No. 6, 57 (2015).
3. A. I. Morozov, *Introduction to Plasma Dynamics* (Fizmatlit, Moscow, 2006) [in Russian].
4. Y. P. Raizer, *Physics of Gas Discharge: Tutorial* (Nauka, Moscow, 1987) [in Russian].
5. V. P. Savinov, Doctoral Dissertation on Physics and Chemistry of Plasma. (Lomonosov Moscow State University, Moscow, 2001) [in Russian].
6. V. P. Savinov, in *Proceedings of VII meeting on physics of gas discharge* (Samara, 1994), Vol. 1, pp. 106–107.
7. V. P. Kim, *Technical Physics* **85** (3), 45 (2015).
8. V. P. Kim and A. I. Skrilnikov, E.K. Sidorenko, *Aviatsionno-kosmicheskaya tehnika i tehnologiya*, No. 2, 112 (2006).
9. F. F. Chen, *Lecture Notes on Langmuir Probe Diagnostics, Mini-Course on Plasma Diagnostics*. (IEEE-ICOPS meeting, Jeju, Korea, June 5, 2003).
10. Y. P. Raizer, M. N. Shneider, and N. A. Yatsenko, *Capacitive RF Discharge: Physics. Experimental Technique. Applications*. (Izd. Moskovsogo Fiz.-Teh. Instituta, Moscow, 1995) [in Russian].