

Комбинация емкостного высокочастотного разряда и разряда постоянного тока для использования в плазменном ускорителе с замкнутым дрейфом электронов. Часть III. Математическое моделирование

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

Выполнено математическое моделирование гибридного разряда на основе высокочастотного емкостного разряда с постоянной составляющей, помещенного в магнитное поле с преимущественной радиальной компонентой. Геометрия рассмотренного источника плазмы близка к ускорителю с замкнутым дрейфом электронов. Показано, что рядом с активным электродом и на срезе канала возникают квазистационарные скачки потенциала, ускоряющие ионы в сторону активного электрода и в направлении из канала. В области скачков потенциала возникает азимутальный дрейф электронов. Наличие постоянного смещения активного электрода приводит к повышению потенциала плазмы и увеличению энергии ионов на выходе из канала.

Ключевые слова: высокочастотный разряд, PIC-метод, ускоритель с замкнутым дрейфом электронов, электроны, ионы, дрейф электронов, скрещенные поля.

Ссылка: Задириев И. И., Кралькина Е. А., Вавилин К. В., Тараканов В. П., Швыдкий Г. В., Александров А. Ф. // Прикладная физика. 2018. № 5. С. 33.

Reference: I. I. Zadiriev, E. A. Kralkina, K. V. Vavilin, V. P. Tarakanov, G. V. Shvydkii, and A. F. Aleksandrov, Prikl. Fiz., No. 5, 33 (2018).

Введение

Основываясь на аналогии между разрядом постоянного тока и емкостным высокочастотным (ВЧ) разрядом [1], в работах [2–4] было предложено использовать емкостный ВЧ-разряд в качестве рабочего процесса ускорителя с замкнутым дрей-

фом электронов, конструкция и принцип действия которого описаны в [5, 6]. Полученные ранее в [2–4] результаты указали на перспективность подхода, однако его недостатком оказалась невозможность независимого управления плотностью и энергией потока ионов. В двух последующих работах [7, 8] этой серии было показано, что указанный недостаток можно обойти, применяя в качестве рабочего режима источника плазмы гибридный разряд, а именно, высокочастотный емкостный разряд и разряд постоянного тока.

В настоящей, третьей работе цикла, представлены результаты математического моделирования, цель которого состоит в прояснении физических процессов, происходящих в гибридном разряде.

Численная модель

Математическое моделирование физических процессов в емкостном ВЧ-разряде, помещенном во внешнее радиальное магнитное поле, выполнялось посредством программы KARAT, разработанной В. П. Таракановым [9].

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.
Тараканов Владимир Павлович^{2,3}, с.н.с., доцент, д.ф.-м.н.
Швыдкий Георгий Вячеславович⁴, аспирант.
Александров Андрей Фёдорович¹, г.н.с., д.ф.-м.н.

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

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

²Объединенный институт высоких температур РАН.
Россия, 125412, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2.

³НИЯУ МИФИ.

Россия, 115409, Москва, Каширское ш., 31.

⁴Институт 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.,
Тараканов В. П., Швыдкий Г. В., Александров А. Ф., 2018

Математической моделью, лежащей в основе кода, являются уравнения Максвелла с различными материальными уравнениями, в т. ч. в виде кинетического уравнения, решаемого методом частиц (т. н. PIC-метод). Поскольку экспериментально исследованная модель источника плазмы обладает азимутальной симметрией, в работе было выполнено двумерное моделирование разряда в цилиндрических R - Z координатах. С одной стороны, это, конечно, исключает из рассмотрения возможные азимутальные неустойчивости разряда, но, с другой стороны, значительно упрощает задачу и уменьшает время счёта, которое для трёхмерного случая оказалось неоправданно большим.

Геометрия моделируемого промежутка изображена на рис. 1. Счетная область представляла собой цилиндр длиной 15 см и радиусом 10 см. Рассмотренная геометрия источника плазмы близка к геометрии лабораторного источника, использованного в экспериментах [7, 8].

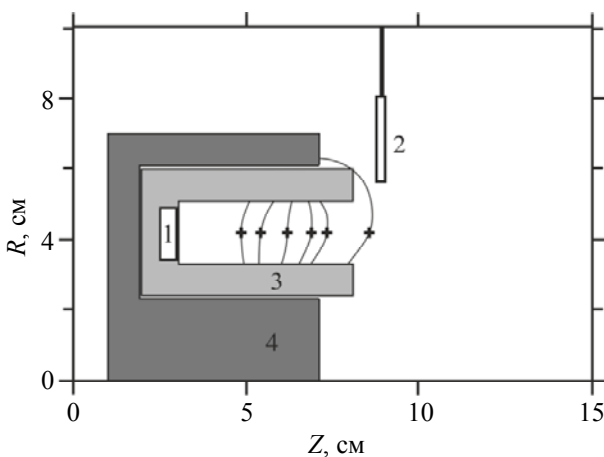


Рис. 1. Геометрия моделируемого промежутка: 1 – активный электрод, 2 – заземлённый электрод, 3 – диэлектрик (керамические стенки разрядного канала), 4 – проводник (металлический корпус). В разрядном канале показаны силовые линии магнитного поля, проходящие через отмеченные крестом точки.

Ограниченный диэлектрическими стенками разрядный канал имел форму тороида прямоугольного сечения. В глубине канала в контакте с плазмой располагался активный электрод. Заземленный электрод был вынесен за пределы канала. Магнитное поле на срезе канала обладало преимущественной радиальной компонентой.

В ходе моделирования просчитывалась динамика условных макрочастиц, соответствующих электронам и ионам. При этом электроны делились на два сорта в зависимости от происхождения, а именно, на электроны, рождённые вследствие ионизации нейтрального газа электронным ударом, и электроны, появившиеся за счёт ион-

электронной эмиссии. Концентрация нейтрального газа задавалась постоянной величиной в разрядном канале и на порядок меньшей вне него. Столкновительные процессы моделировались методом Монте-Карло, и в их число входили прямая ионизация и возбуждение атомов электронами. В качестве рабочего газа использовался ксенон, а его соответствующие сечения были взяты из работы [10].

Расчеты производились следующим образом: в начальный момент времени в разрядный канал помещалась затравочная электронная плазма с плотностью макрочастиц, соответствующей концентрации реальных заряженных частиц $5 \times 10^9 \text{ см}^{-3}$, что являлось имитацией плазмы, образовавшейся в результате пробоя в разрядном канале. Далее рассматривалась временная эволюция системы до тех пор, пока параметры разряда не выходили на свои квазистационарные значения. В результате исследовались зависимости этих квазистационарных параметров разряда от входных данных (напряжения на активном электроде, величины магнитного поля и т. д.) и их распределения по моделируемому промежутку.

В тех случаях, когда концентрация плазмы в ходе счёта падала ниже $5 \times 10^8 \text{ см}^{-3}$, моделирование останавливалось, и делался вывод о том, что при заданных входных параметрах разряд гаснет.

Для уменьшения времени счёта масса ионов была установлена равной 2000 масс электрона. Подобный приём, как это показали предыдущие тесты, приводит к заниженным в 2–2,5 раза значениям концентрации плазмы, но в то же время практически не влияет на поля в слоях объемного заряда и, следовательно, на потенциал плазмы относительно земли.

Для сходимости применяемых в программе КАРАТ разностных схем и применимости PIC-метода для описания разряда параметры численной модели удовлетворяли следующим требованиям:

- шаг сетки был меньше любого минимального характерного размера моделируемого объекта, а также дебаевского радиуса плазмы;
- шаг по времени был меньше всех характерных временных масштабов системы, в том числе периода ленгмюровских колебаний, периода ларморовского вращения, времени свободного пробега частиц;
- внутри ячейки и внутри дебаевской сферы содержалось не менее нескольких десятков макрочастиц.

Диапазон исходных параметров, при которых проводился численный счёт, выглядел следующим образом:

Амплитуда напряжения на активном электроде	500–3000 В
Частота колебаний напряжения на активном электроде	12,5 МГц
Магнитная индукция на срезе разрядного канала	0–300 Гс
Плотность нейтрального газа в канале	$1 \times 10^{13} - 5 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$
Коэффициент ион-электронной эмиссии γ	0,01
Постоянное смещение активного электрода	0–1000 В

В большинстве случаев для достижения разрядом квазистационарного состояния требовалось провести численный счёт в течение первых 7–12 мкс.

Результаты расчетов

Расчеты показали, что разряд имеет вид кольца, расположенного в канале в области максимума магнитного поля. Стационарный режим горения разряда достигался в диапазоне амплитуд ВЧ-напряжения 1250–2750 В, а также индукции магнитного поля в области её максимума 150–300 Гс. При значениях меньших, чем обозначенные нижние границы перечисленных параметров, разряд гас.

Типичное мгновенное распределение потенциала в разрядном промежутке показано на рис. 2. Как видно, в центральной части канала потенциал плазмы не изменяется, в то время как вблизи активного электрода и среза канала наблюдаются скачки потенциала, свидетельствующие о формировании двух слоев пространственного заряда (СПЗ). Наблюдаемая картина близка к существующей в обыкновенном емкостном разряде. Поля в плазме малы, а в СПЗ присутствуют не только осциллирующая на основной частоте компонента электрического поля, но и постоянная по времени составляющая, близкая по величине к амплитуде ВЧ-компоненты. Вместе с тем, есть и значительное отличие распределения потенциала от существующего в обычном емкостном ВЧ-разряде, где слои пространственного заряда формируются вблизи электродов. В рассмотренном в настоящей работе случае рядом с активным электродом также формируется скачок потенциала, однако скачок потенциала, который должен был бы располагаться рядом с заземленным электродом, смещен на срез канала, т. е. в область, где радиальное магнитное поле достигает максимума.

Расчеты показали, что увеличение индукции магнитного поля приводит к уменьшению скачков квазистационарного падения потенциала как у активного электрода, так и на срезе канала. Из физики емкостного ВЧ-разряда [1] известно, что квазистационарный скачок потенциала принимает такую величину, которая необходима для того, чтобы уравнивать уход электронов и ионов из разряда за период изменения ВЧ-напряжения. Электроны существенно более подвижны, чем ионы, по-

этому постоянное электрическое поле в приэлектродных слоях препятствует уходу электронов из разряда. Появление радиального магнитного поля затрудняет уход электронов на электроды, поэтому в присутствии магнитного поля постоянное электрическое поле, необходимое для выравнивания электронного и ионного токов, становится меньше.

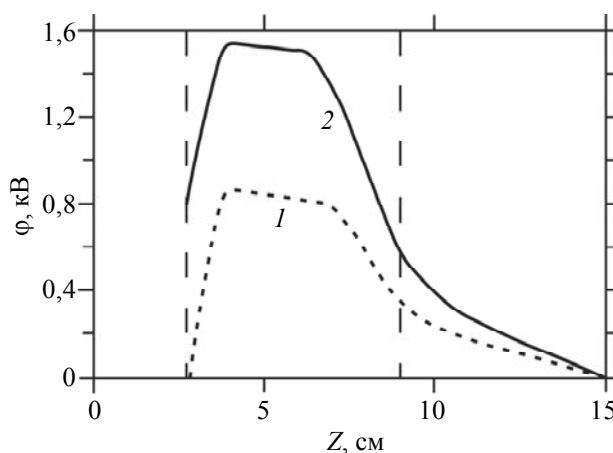


Рис. 2. Мгновенное распределение электрического потенциала ϕ вдоль центра разрядного канала ($R = 4,2$ см) при величинах постоянного смещения активного электрода 0 В (кривая 1) и 800 В (кривая 2). Вертикальными пунктирными линиями отмечены границы разрядного канала.

Необходимо отметить, что скачок потенциала, возникающий у среза канала, ускоряет ионы по направлению из канала, поэтому увеличение индукции магнитного поля, влияющего на скачок потенциала, приводит к понижению энергии ионов, что и наблюдалось экспериментально [8].

Рассмотрим теперь динамику электронов в разряде. В центральных частях канала формируется плазма. Увеличение амплитуды разрядного ВЧ-напряжения V_{ω} приводит к увеличению концентрации плазмы n_e , причём зависимость имеет почти линейный характер. Чем больше магнитное поле, тем выше был угол наклона зависимости $V_{\omega}(n_e)$ в области амплитуд до 2 кВ. Повышение концентрации нейтрального газа в канале сопровождается сужением слоев, вследствие чего распределение концентрации плазмы уширяется. В местах локализации постоянного электрического поля вблизи активного электрода и на выходе из разрядного канала возникают скрещенные радиальное магнитное и продольное электрическое

поля, что приводит к появлению азимутального дрейфа электронов по аналогии с азимутальным дрейфом электронов в ускорителях с замкнутым дрейфом электронов (см. рис. 3).

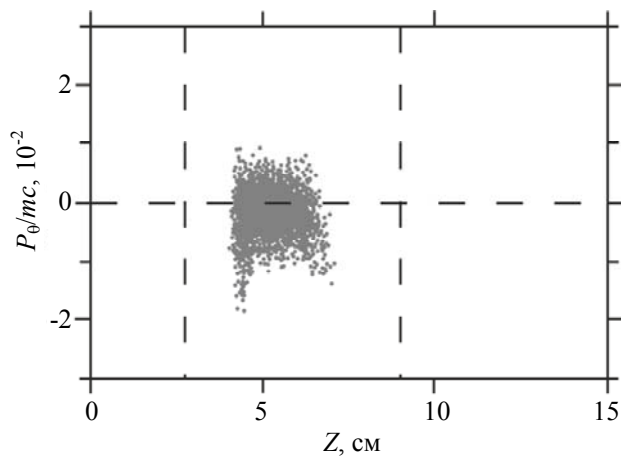


Рис. 3. Мгновенное распределение обезразмеренного азимутального импульса P_θ случайной выборки из 1000 макрочастиц (серые точки на графике) в разрядном канале вдоль координаты Z .

Во всём исследованном диапазоне параметров температура электронов в плазме практически не изменяется и составляет величину около 8 эВ. В СПЗ и примыкающих к ним областях плазмы наблюдается рост средней энергии электронов, связанный со стохастическим нагревом электронов и ускорением по направлению в сторону плазмы электронов, рождающихся на поверхности электрода вследствие ион-электронной эмиссии.

В заключение рассмотрим влияние постоянного смещения активного электрода на картину распределения потенциала. На рис. 2 изображена зависимость потенциала от координаты при подаче на электрод постоянного смещения 800 вольт. Как видно, потенциал плазмы увеличивается с 800 до 1500 вольт относительно земли, т. е. примерно на величину постоянного смещения электрода. Соответственно увеличивается падение потенциала между плазмой и внешним электродом, а также энергия ионов на выходе из источника (см. рис. 4). Таким образом, наблюдавшийся в эксперименте [8] рост энергии ионов при увеличении смещения активного электрода связан с повышением потенциала плазмы, находящейся в контакте с активным электродом. В реальных экспериментах, однако, картина физических процессов более сложна, т. к. подача смещения на активный электрод сопровождается самосогласованным уменьшением амплитуды ВЧ-напряжения, приложенного к разрядному промежутку, при использовании той же мощности ВЧ-генератора. Последний эффект в наших расчетах не учитывался.

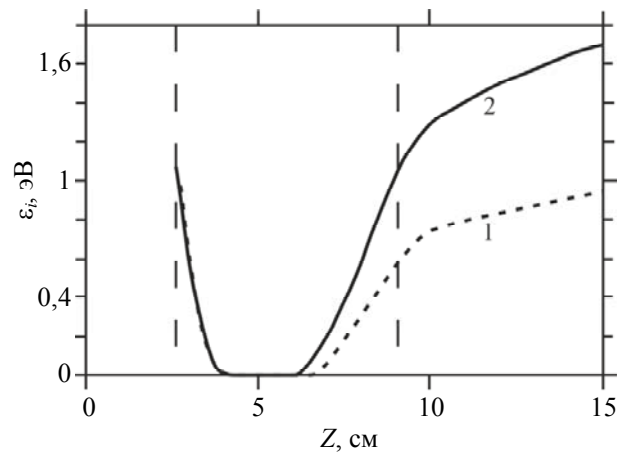


Рис. 4. Средняя энергия ионов ϵ_i в зависимости от координаты Z для случаев постоянного смещения активного электрода 0 В (кривая 1) и 800 В (кривая 2). Вертикальными пунктирными линиями обозначены границы разрядного канала.

Заключение

Проведённый численный счёт показал, что в емкостном высокочастотном разряде с радиальным магнитным полем и контактирующим с плазмой активным электродом формируется ускоренный поток ионов, выходящий из разрядного канала в случае его открытой геометрии. Физической причиной ускорения ионов является квазистационарный скачок потенциала, формирующийся на срезе канала, где максимальна радиальная компонента внешнего магнитного поля. Подача постоянного смещения на активный электрод, находящийся в контакте с плазмой, приводит к увеличению потенциала плазмы относительно земли и росту энергии ионов на выходе из канала. Концентрация плазмы может регулироваться изменением амплитуды ВЧ-напряжения, подаваемого на активный электрод.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Райзер Ю. П., Шнейдер М. Н., Яценко Н. А. Высоко-частотный емкостный разряд: Физика. Техника эксперимента. Приложения. – М.: изд. МФТИ: Наука, Физматлит, 1995.
2. Задириев И. И., Рухадзе А. А., Кралькина Е. А., Павлов В. Б., Вавилин К. В., Тараканов В. П. // ЖТФ. 2016. Т. 86. Вып. 11. С. 1.
3. Задириев И. И., Рухадзе А. А., Кралькина Е. А., Павлов В. Б., Вавилин К. В. // Прикладная физика. 2015. № 6. С. 57.
4. Задириев И. И. Использование емкостного высокочастотного разряда низкого давления в радиальном магнитном поле для получения ускоренного потока ионов: дис. ... к-та физ.-мат. наук: 01.04.08. – М., 2017.

5. Морозов А. И. Введение в плазмодинамику. – М.: Физматлит, 2006.
6. Ким В. П. // ЖТФ. 2015. Т. 85. Вып. 3. С. 45.
7. Задириев И. И., Кралькина Е. А., Вавилин К. В., Швидкий Е. В., Александров А. Ф. // Прикладная физика. 2018. № 2. С. 10.
8. Задириев И. И., Кралькина Е. А., Вавилин К. В., Швидкий Е. В., Александров А. Ф. // Прикладная физика. 2018. № 3. С. 5.
9. Tarakanov V. P. User's Manual for Code KARAT. – Springfield: Berkeley Research Associates inc., 1992.
10. de Heer F. J., Jansen R. H. J., van der Kaay W. // Journal of Physics B: Atomic and Molecular Physics. 1979. Vol. 12. No. 6. P. 979.

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 III. Numerical simulation

I. I. Zadiriev¹, E. A. Kralkina¹, K. V. Vavilin¹, V. P. Tarakanov^{2,3},
G. V. Shvydkii⁴, and A. F. Aleksandrov¹

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

²Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences
Bd. 2, 13 Izhorskaya st., Moscow, 125412, Russia

³National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)
31 Kashirskoe shosse, Moscow, 115409, Russia

⁴Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences
38 Vavilov st., Moscow, 119991, Russia

Received February 1, 2018

Consideration is given to results of numerical simulation of the combined DC-RF discharge in external radial magnetic field. Geometry of simulated plasma source was close to that of a closed electron drift accelerator. It is shown that the plane quasistationary potential drops emerge near the active electrode and discharge channel cut-off. These potential drops accelerate ions from plasma towards the active electrode and discharge channel exit. In the areas of potential drops, an electron azimuthal drift appears. The applying constant voltage bias to the active electrode causes plasma potential and ion energy on the exit of discharge channel to rise.

Keywords: RF discharge, PIC method, closed electron drift accelerator, electrons, ions, electron drift, crossed fields.

REFERENCES

1. Y. P. Raizer, M. N. Shneider, and N. A. Yatsenko, *Radio-Frequency Capacitive Discharges* (Nauka Fizmatlit, Moscow, 1995).
2. 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).
3. I. I. Zadiriev, A. A. Rukhadze, E. A. Kralkina, V. B. Pavlov, and K. V. Vavilin, *Prikl. Fiz.*, No. 6, 57 (2015).
4. 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].
5. A. I. Morozov, *Introduction to Plasmadynamics* (Fizmatlit, Moscow, 2006) [in Russian].
6. V. P. Kim, *Tech. Phys.* **85** (3), 45 (2015).
7. I. I. Zadiriev, E. A. Kralkina, K. V. Vavilin, E. V. Shvidkiy, and A. F. Aleksandrov, *Prikl. Fiz.*, No. 2, 10 (2018).
8. I. I. Zadiriev, E. A. Kralkina, K. V. Vavilin, E. V. Shvidkiy, and A. F. Aleksandrov, *Prikl. Fiz.*, No. 3, 5 (2018).
9. V. P. Tarakanov, *User's Manual for Code KARAT* (Berkeley Research Associates, Inc., Springfield, 1992).
10. F. J. de Heer, R. H. J. Jansen, and W. van der Kaay, *Journal of Physics B: Atomic and Molecular Physics* **12** (6), 979 (1979).