

## Исследования комбинации индуктивного высокочастотного разряда и разряда постоянного тока

П. А. Неклюдова, А. М. Никонов, Е. А. Кралькина, К. В. Вавилин, И. И. Задириев

*В настоящей работе изучены характеристики разряда, основанного на комбинации индуктивного высокочастотного (ВЧ) разряда и разряда постоянного тока. Исследованы закономерности вложения ВЧ-мощности в плазму, выполнены измерения азимутальной  $V_\phi$  и продольной  $V_z$  составляющих высокочастотного магнитного поля, аксиального распределения концентрации и температуры электронов, потенциала пространства. В качестве объекта исследования использован однокамерный цилиндрический источник плазмы диаметром 20 см. Канал постоянного тока сформирован двумя электродами, расположенными на торцах цилиндрического источника плазмы. Измерения выполнены в аргоне в диапазоне давлений 0,1–2,3 мТорр при значениях индукции внешнего магнитного поля 0–60 Гс и мощностях ВЧ-генератора 0–1000 Вт. Показано, что при появлении канала постоянного тока потенциал плазмы понижается по сравнению с чисто индуктивным разрядом. При подаче между электродами напряжения 100 В амплитуда продольной и азимутальной компонент магнитного ВЧ-поля возрастает, что связано с увеличением коэффициента отражения волны на границе источника плазмы.*

*Ключевые слова:* индуктивный, высокочастотный, разряд, плазма, волны, разряд постоянного тока.

### Введение

Высокочастотные (ВЧ) индуктивные плазменные реакторы и источники ионов низкого давления уже в течение нескольких десятилетий являются важнейшей составляющей многих современных земных и космических технологий.

Широкому распространению технических применений ВЧ-разряда способствует его основное достоинство, а именно, возможность получения высокой концентрации электронов при относительно невысоком уровне ВЧ-мощности [1–7]. Наиболее часто индуктивный ВЧ-разряд используется в качестве рабочего режима плазменных реакторов, предназначенных для травления подложек, осаждения и напыления функциональных

покрытий [1–7]. Как правило, для организации потока ускоренных ионов в таких реакторах на подложку подается ВЧ-потенциал или постоянное отрицательное смещение относительно стенок плазменного реактора. При этом в реакторе фактически имеет место комбинация разрядов – основного индуктивного ВЧ-разряда и дополнительного в виде емкостного ВЧ-разряда или разряда постоянного тока.

В работе [8] подробно изучено влияние дополнительного емкостного разряда на свойства плазмы и величину ВЧ-мощности, поступающую в разряд через индуктивный канал. Показано, что наличие емкостного канала приводит к увеличению доли мощности ВЧ-генератора, поступающей в разряд через индуктивный канал, стабилизации разряда и исчезновению гистерезиса при переходе разряда из Е- в Н-моду.

Целью данной работы является исследование однокамерного источника плазмы, рабочий режим которого основан на комбинации индуктивного ВЧ-разряда и разряда постоянного тока. Конкретно рассмотрен цилиндрический источник плазмы диаметром 20 см и длиной 20 см. Измерения выполнены в аргоне в диапазоне давлений 0,1–2,3 мТорр при значениях внешнего магнитного поля 0–60 Гс и мощностях ВЧ-генератора 0–1000 Вт.

---

Неклюдова Полина Алексеевна, м.н.с., к.ф.-м.н.  
Никонов Александр Михайлович, аспирант.  
Кралькина Елена Александровна, в.н.с., д.ф.-м.н.  
Вавилин Константин Викторович, вед. инженер.  
Задириев Илья Игоревич, инженер.  
Физический факультет МГУ.  
Россия, 111991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2.  
Тел. 8(495) 939-47-73.  
E-mail: neklydova\_pa@mail.ru; nikonov.207@mail.ru;  
ekralkina@mail.ru; viline@inbox.ru; s\_333\_52@mail.ru

*Статья поступила в редакцию 15 июня 2018 г.*

---

© Неклюдова П. А., Никонов А. М., Кралькина Е. А., Вавилин К. В., Задириев И. И., 2018

### Экспериментальная установка и методики измерений

Схема источника плазмы подробно описана в работе [9]. Источник состоит из кварцевого цилиндра диаметром 20 см. Он установлен на металлической вакуумной камере диаметром 60 и высотой 36 см. Откачка вакуумной камеры осуществляется с помощью форвакуумного и турбомолекулярного насосов. Нижняя часть кварцевого цилиндра находится на 12 см ниже верхнего фланца металлической камеры. На нижнем фланце металлической камеры расположен алюминиевый цилиндр, на котором крепится электрод, ограничивающий длину разряда. В данной работе исследовался разряд длиной 20 см.

Ввод ВЧ-мощности осуществляется с помощью охлаждаемой трехвитковой спиральной антенны, расположенной вокруг газоразрядной камеры на расстоянии 8–12 см от верхнего торца источника плазмы. Антенна подключается к системе согласования, связанной с генератором, работающим на частоте 13,56 МГц. Мощность генератора можно плавно регулировать в диапазоне от 0 до 1000 Вт. Ток антенны измеряется с помощью пояса Роговского.

Канал постоянного тока сформирован двумя электродами, расположенными на торцах цилиндрического источника плазмы. На катод, которым служил электрод, ограничивающий объем источника плазмы (ИП) снизу, подается потенциал  $V_{DC}$ , отрицательный относительно заземленного верхнего электрода. Значения напряжения варьируются от 0 до 300 В.

Внешнее магнитное поле создается при помощи электромагнитов. Выбранная конфигурация магнитов обеспечивает равномерность линий магнитного поля в области расположения антенны и ниже в пределах 15 %. Исследованный диапазон изменения индукции внешнего магнитного поля составляет 10–65 Гс. В верхней части источника плазмы магнитное поле является слабо расходящимся.

На верхнем фланце газоразрядной камеры располагается газовод для подачи в источник плазмы рабочего газа – аргона, а также вакуумный ввод, с помощью которого в разряд вводится подвижный магнитный зонд или зонд Ленгмюра.

В работе проводились измерения

- 1) доли мощности ВЧ-генератора, поступающей в плазму,
- 2) азимутальной  $B_\phi$  и продольной  $B_z$  составляющих высокочастотного магнитного поля,
- 3) продольного распределения концентрации и температуры электронов, потенциала пространства с помощью зондов Ленгмюра.

В случае индуктивного ВЧ-разряда низкого давления, как правило, не вся мощность ВЧ-генератора поглощается плазмой. То есть мощность, поступающая от ВЧ-генератора,  $P_{gen}$  делится между двумя нагрузками: антенной, обладающей активным сопротивлением  $R_{ant}$ , и плазмой, характеризующейся эквивалентным сопротивлением  $R_{pl}$ . Понятие эквивалентного сопротивления было введено в работах [10–12].  $R_{pl}$  имеет размерность сопротивления и определяет меру способности плазмы поглощать ВЧ-мощность. Методика определения доли ВЧ-мощности, поступающей в плазму, подробно описана в работах [13, 14]. Подводимая к разряду мощность от ВЧ-генератора в работе определялась как разность между падающей и отраженной мощностью. Ток, текущий через антенну  $I_{ant}$ , определялся с помощью пояса Роговского [15].

Измерения азимутальной  $B_\phi$  и продольной  $B_z$  составляющих высокочастотного магнитного поля осуществлялись с помощью магнитного зонда [9, 15, 16], помещенного внутрь плазмы. В условиях проводимых в работе экспериментов, помещенный в плазму магнитный зонд не приводил к искажениям и изменениям её параметров, что было подтверждено результатами измерений пространственного распределения интенсивности свечения плазмы при отсутствии и наличии магнитного зонда. Магнитный зонд для измерения поля  $B_z$  мог перемещаться как вдоль оси (на расстояниях  $z = 8–40$  см от верхнего фланца), так и по радиусу источника плазмы. Магнитный зонд, предназначенный для измерения поля  $B_\phi$ , мог перемещаться только вдоль оси источника плазмы. Он располагался на расстоянии 5 см от оси источника плазмы. В процессе экспериментов измерялась амплитуда сигнала магнитного зонда, а также разность фаз между исследуемым сигналом и постоянным сигналом с антенны.

Параллельно с измерением магнитных ВЧ-полей, генерируемых в плазме, проводились зондовые и спектральные измерения параметров плазмы. Ленгмюровский зонд диаметром 0,35 мм и длиной 7 мм мог перемещаться вдоль оси и по радиусу источника плазмы. Для проведения зондовых измерений использовалась стандартная электрическая схема, включающая в себя фильтр для подавления ВЧ-составляющих напряжения, подаваемого на зонд. Указанное напряжение и ток зонда регистрировались с помощью АЦП. Обработка результатов зондовых измерений проводилась с использованием стандартной процедуры выделения электронной ветви ВАХ, описанной в [15], т. к. величина использованного внешнего магнитного поля мала. Потенциал плазмы определялся как потенциал точки перегиба ВАХ зонда.

Функция распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ) определялась двукратным численным дифференцированием электронного тока по потенциалу зонда [16] после предварительной аппроксимации зондовой характеристики полиномом, подобранным методом наименьших квадратов. В этом случае потенциал плазмы определяется из условия  $d^2i(V_{pl})/dV^2 = 0$ . В данных экспериментах при использовании зонда Ленгмюра реализуются условия, соответствующие измерениям в невозмущенной плазме.

Исследования проводились в аргоне в диапазоне давлений от  $1,1 \times 10^{-4}$  Торр до  $2,3 \times 10^{-3}$  Торр.

### Результаты измерений

#### Вложение мощности

В работе [17] были подробно исследованы закономерности вложения ВЧ-мощности в плазму при чисто индуктивном возбуждении разряда. В настоящей работе было показано, что при давлениях менее 1 мТорр эффективность вложения ВЧ-мощности  $P_{pl}$  немонотонно зависит от индукции внешнего магнитного поля, а именно, при магнитных полях порядка 10–30 Гс наблюдается локальный максимум  $P_{pl}$ . Рост мощности ВЧ-генератора и давления аргона сопровождаются уширением локального максимума и его смещением в область больших значений  $B$ . Результаты, полученные в настоящей работе, подтвердили сделанные в [17] выводы.

На рис. 1 показана зависимости мощности  $P_{pl}$ , поступающей в разряд через индуктивный канал и канала постоянного тока, от индукции внешнего магнитного поля  $B$ . Все данные получены при мощностях ВЧ-генератора 100 и 300 Вт в источнике плазмы длиной 20 см. На рис. 1 также показана доля мощности, поступающая в разряд через канал постоянного тока  $P_{DC}$  при условии, что на катод подан потенциал -100 В. Такая величина потенциала может использоваться в плазменных реакторах, в том числе предназначенных для травления [1–7].

Рис. 1 показывает, во-первых, что  $P_{DC}$  изменяется пропорционально мощности, поступающей в разряд через индуктивный канал  $P_{pl}$ , а, во-вторых, что абсолютные значения  $P_{DC}$  малы по сравнению с величинами  $P_{pl}$ . Это объясняет слабое влияние канала постоянного тока на эффективность вложения ВЧ-мощности.

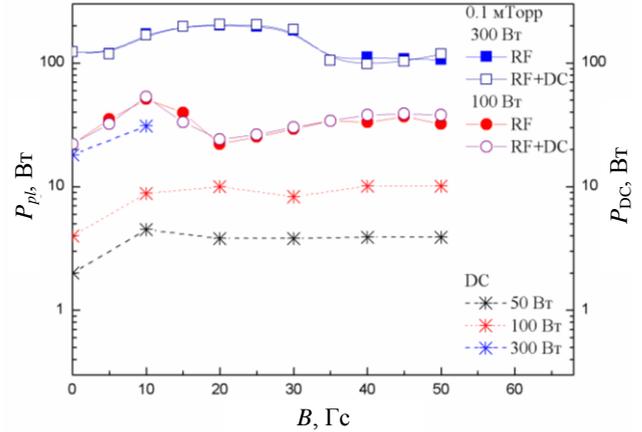


Рис. 1. Зависимость мощности, поступающей в разряд через индуктивный канал и канал постоянного тока, от величины внешнего магнитного поля при различных мощностях ВЧ-генератора. Измерения с источником плазмы длиной 20 см.

Рассмотрим ВАХ постоянной составляющей разряда. Измеренные кривые показаны на рис. 2. Как видно, при отрицательном смещении электрода (катода)  $V_{DC} = 10-50$  В во всех рассмотренных случаях происходит формирование приэлектродного слоя, но при  $V_{DC} > 10-50$  В возникает аномальный режим горения тлеющего разряда. При фиксированных значениях  $P_{gen}$  и  $B$  незначительный рост разрядного тока возможен только при существенном увеличении напряжения, приложенного к каналу постоянного тока. Существенное увеличение разрядного тока возможно за счет увеличения мощности ВЧ-генератора и выбора индукции внешнего магнитного поля, соответствующего максимуму эффективности поглощения ВЧ-мощности.

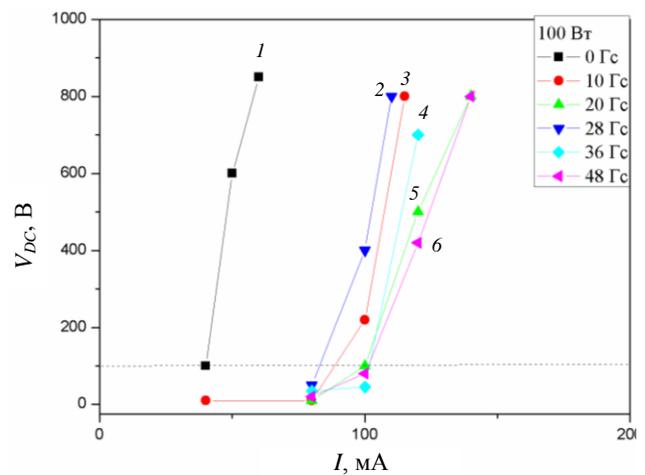


Рис. 2. ВАХ разряда постоянного тока. Кривые 1 – 0 Гс; 2 – 10 Гс; 3 – 20 Гс; 4 – 28 Гс; 5 – 36 Гс; 6 – 48 Гс.

### Параметры плазмы

Рассмотрим далее, как изменяются параметры плазмы при подаче смещения на катод.

На рис. 3 показано аксиальное изменение потенциала плазмы при отсутствии и наличии смещения на катоде.

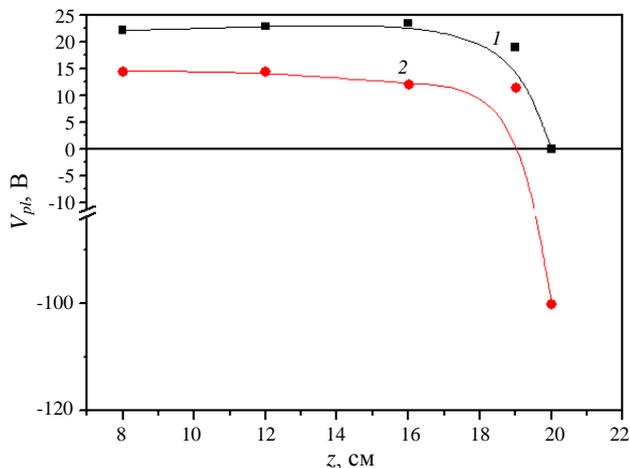


Рис. 3. Аксиальное изменение потенциала плазмы при отсутствии и наличии смещения на катод: кр. 1 – RF; кр. 2 – RF + DC, 100 В.

Наибольшие изменения при появлении канала постоянного тока претерпевает потенциал плазмы. Он понижается по сравнению с чисто индуктивным разрядом, где в основном объеме плазмы наблюдается равномерное (в пределах погрешности эксперимента) распределение потенциала. В разряде постоянного тока основное падение потенциала сосредоточено в прикатодной части разряда, а потенциал плазмы в положительном столбе близок к потенциалу анода, роль которого в нашем случае играет верхний заземленный фланец. Неудивительно при этом, что появление канала постоянного тока приводит к уменьшению потенциала и его приближению к потенциалу заземленного верхнего электрода, оставаясь, однако, на 10–15 В выше потенциала заземленного фланца. Таким образом, в технологических плазменных реакторах энергия ионов, бомбардирующих подложку, на 10–15 эВ выше, чем энергия, задаваемая потенциалом подложки.

В работе также получено, что даже небольшой потенциал  $V_{DC}$ , поданный на катод, приводит к существенным изменениям параметров плазмы. При наличии в разряде канала постоянного тока концентрация плазмы в основном объеме плазмы понижается, в то время как температура электронов  $T_e$  начинает расти по мере приближения к катоду. Полученные значения концентрации и температуры электронов лежат в диапазонах  $10^{10}$ – $10^{11}$  см<sup>-3</sup> и 2–4 эВ соответственно. При приближе-

нии к нижнему электроду на расстоянии примерно 2 см от него наблюдается рост  $T_e$  на 1–2 эВ. Рост тем выше, чем ниже потенциал катода относительно земли. Понижение концентрации электронов вызвано увеличением потерь энергии в разряде, возникающим за счет уноса энергии ускоренными прикатодным падением потенциала ионами на катод. Этот вопрос подробно рассматривался в работе [8]. Рост температуры электронов, по-видимому, связан с появлением в разряде быстрых электронов, ускоренных в прикатодной области разряда.

### Структура волн

В заключение было изучено влияние отрицательного смещения, подаваемого на нижний электрод, на структуру волн, возбуждаемых в ИП. Полученные результаты для продольной компоненты магнитного ВЧ-поля  $B_z$  показаны на рис. 4. Как видно, наличие отрицательного смещения на нижнем электроде приводит к существенному увеличению амплитуды магнитных ВЧ-полей, но не сопровождается изменением структуры возбуждаемой волны. При подаче постоянного смещения на электрод амплитуда азимутальной составляющей поля ведет себя аналогично продольной.

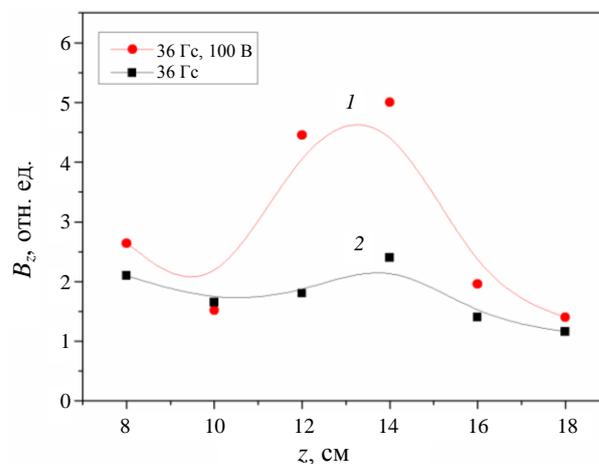


Рис. 4. Продольное распределение амплитуды  $B_z$  при наличии (1) и отсутствии (2) постоянного смещения, внешнее магнитное поле 36 Гс.

Для описания экспериментальных данных естественно предположить, что профиль волны, возникающий в источнике плазмы, определяется суперпозицией основной волны, возбуждаемой узлом ввода ВЧ-мощности, и волной, возникающей в результате отражения основной волны от нижнего металлического фланца источника плазмы.

Оценки зависимости амплитуды результирующей волны от продольной координаты при различных значениях коэффициента отражения и

поглощения волны показали, что амплитуда волны растет при увеличении коэффициента отражения и уменьшении коэффициента затухания. Выполненные эксперименты показали, что эффективность поглощения ВЧ-мощности практически не зависит от наличия отрицательного смещения нижнего электрода. Это позволяет сделать вывод, что увеличение амплитуды продольной и азимутальной компонент магнитного ВЧ-поля при наличии приэлектродного падения потенциала связано с повышением коэффициента отражения волны. Последнее, в свою очередь, может быть следствием формирования приэлектродного слоя и наличия градиента концентрации электронов вблизи слоя.

### Заключение

Эксперименты показали, что при давлениях менее 1 мТорр эффективность вложения ВЧ-мощности немонотонно зависит от индукции внешнего магнитного поля, а именно, при магнитных полях порядка 10–30 Гс наблюдается локальный максимум  $P_{pl}$ . Рост мощности ВЧ-генератора и давления аргона сопровождаются уширением локального максимума и его смещением в область больших значений  $B$ . При подаче на нижний электрод напряжения -100 В эффективность вложения ВЧ-мощности возрастает не более чем на 5 %.  $P_{DC}$  изменяется пропорционально мощности, поступающей в разряд через индуктивный канал  $P_{pl}$ , а абсолютные значения  $P_{DC}$  малы по сравнению с величинами  $P_{pl}$ .

При постоянном смещении электрода во всех рассмотренных случаях происходит формирование приэлектродного слоя, и возникает аномальный режим горения тлеющего разряда. При фиксированных значениях  $P_{gen}$  и  $B$  рост разрядного тока возможен только при существенном увеличении напряжения, приложенного к каналу постоянного тока. При появлении канала постоянного тока потенциал плазмы понижается по сравнению с чисто индуктивным разрядом, где в основном объеме плазмы наблюдается равномерное (в пределах погрешности эксперимента) распределение потенциала.

При подаче на нижний электрод напряжения -100 В амплитуда продольной и азимутальной компонент магнитного ВЧ-поля возрастает, что

связано с увеличением коэффициента отражения волны.

*Авторы выражают благодарность за плодотворное обсуждение результатов работы профессору А. Ф. Александрову, профессору М. В. Кузелеву и доценту И. Н. Карташову.*

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-32-60187 мол\_а\_дк.*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Lieberman M. A., Lichtenberg A. J. Principles of plasma discharges and materials processing — Hoboken. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2005.
2. Chamber P., Braithwaite N. Physics of Radio-frequency Plasmas — N. Y., 2011.
3. Donnelly V. M., Kornblit A. // J. Vac. Sci. Technol. 2013. Vol. A. 31. No. 5. P. 050825.
4. Chen F. F. High Density Plasma Sources. Ed. by Oleg A. Popov — Park Ridge, New Jersey: Noyes Publications, 1996.
5. Conrads H., Schmidt M. // Plasma Sources Sci. Technol. 2000. Vol. 9. P. 441.
6. Hopwood J. // Plasma Sources Sci. Tech. 1992. Vol. 1. P. 109.
7. Галперин В. А., Данилкин Е. В., Мочалов А. И. Процессы плазменного травления в микро- нанотехнологии. — М.: МИЭТ, 2009.
8. Kralkina E. A., Nekliudova P. A., Pavlov V. B., Petrov A. K., Vavilin K. V. // Plasma Sources Sci. Technol. 2017. Vol. 26. P. 055006.
9. Кралькина Е. А., Никонов А. М. // Прикладная физика. 2017. № 6. С. 20.
10. Piejak R. B., Godyak V. A., Alexandrovich B. M. // Plasma Sources. Sci. Technol. 1992. Vol. 1. P. 179.
11. Godyak V. A., Piejak R. B., Alexandrovich B. M. // J. of Appl. Phys. 1999. Vol. 85. No. 2. P. 703.
12. Godyak V. A., Piejak R. B., Alexandrovich B. M. // Plasma Sources. Sci. Technol. 1994. Vol. 3. P. 169.
13. Кралькина Е. А. // УФН. 2008. Т. 178. № 5. С. 519.
14. 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.
15. Хаддлстоун Р., Леонард С. Диагностика плазмы. — М., 1967.
16. Лохте-Хольдгрёвен В. Методы исследования плазмы. — М., 1971.
17. Kralkina E. A., Rukhadze A. A., Nekliudova P. A., Pavlov V. B., Petrov A. K., Vavilin K. V. // AIP Advances. 2018. Vol. 8. P. 035217.

## Studies of a combination of an inductive RF discharge and DC discharge

*P. A. Nekliudova, A. M. Nikonov, E. A. Kralkina, K. V. Vavilin, and I. I. Zadiriev*

Department of Physics, Moscow State University  
Leninskie gory 1 – 2, GSP-1, Moscow, 111991, Russia  
E-mail: nekliudova\_pa@mail.ru; nikonov.207@mail.ru; ekralkina@mail.ru;  
viline@inbox.ru; s\_333\_52@mail.ru

*Received June 15, 2018*

*Properties of the discharge based on combination of an inductive RF discharge and a DC discharge are represented in this paper. Characteristics of RF power absorption in plasma were investigated. Azimuthal  $B_\phi$  and longitudinal  $B_z$  components of RF magnetic field, axial distribution of electron density and temperature, plasma potential were measured. In the study the cylindrical plasma source with a diameter of 20 cm was used. The channel of direct current was formed by two electrodes located at the ends of the cylindrical plasma source. Experiments were carried out in argon in the pressure range 0.1–2.3 mTorr at the values of external magnetic field 0–65 Gs and RF power source's power 0–1000 W. It is shown that plasma potential decreases with appearance of DC channel compared with inductive RF discharge. If the value of applied DC voltage between the electrodes is 100V then amplitudes of azimuthal  $B_\phi$  and longitudinal  $B_z$  components of RF magnetic field increase. It is associated with the increase of the reflection coefficient of the wave at the boundary of the plasma source.*

*Keywords:* inductive, radiofrequency, discharge, plasma, waves, DC discharge.

### REFERENCES

1. M. A. Lieberman and A. J. Lichtenberg, *Principles of plasma discharges and materials processing* (Hoboken. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2005).
2. P. Chamber and N. Braithwaite, *Physics of Radio-frequency Plasmas* (N. Y., 2011).
3. V. M. Donnelly and A. Kornblit, *J. Vac. Sci. Technol. A*, **31** (5), 050825 (2013).
4. F. F. Chen, *High Density Plasma Sources* (Ed. by Oleg A. Popov, Park Ridge, New Jersey: Noyes Publications, 1996).
5. H. Conrads and M. Schmidt, *Plasma Sources Sci. Technol.*, **9**, 441 (2000).
6. J. Hopwood, *Plasma Sources Sci. Technol.*, **1**, 109 (1992).
7. V. A. Galperin, E. V. Danilkin, and A. I. Mochalov, *Processes of plasma etching in micro- and nanotechnologies* (BINOM, Moscow, 2010) [in Russian].
8. E. A. Kralkina, P. A. Nekliudova, V. B. Pavlov, A. K. Petrov, and K. V. Vavilin, *Plasma Sources Sci. Technol.*, **26**, 055006 (2017).
9. E. A. Kralkina and A. M. Nikonov, *Prikl. Fiz.*, No. 6, 20 (2017).
10. R. B. Piejak, V. A. Godyak, and B. M. Alexandrovich, *Plasma Sources. Sci. Technol.*, **1**, 179 (1992).
11. V. A. Godyak, R. B. Piejak, and B. M. Alexandrovich, *J. of Appl. Phys.*, **85** (2), 703 (1999).
12. V. A. Godyak, R. B. Piejak, and B. M. Alexandrovich, *Plasma Sources. Sci. Technol.*, **3**, 169 (1994).
13. E. A. Kralkina, *Phys. Usp.*, **51** (5), 493 (2008).
14. 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).
15. *Plasma Diagnostic Techniques*. Ed. by R. H. Huddlestone, L. S. Leonard (Academic, New York, 1965).
16. *Plasma Diagnostics*. Ed. by W. Lochte-Holtgreven (North-Holland Publishing Company, 1968).
17. E. A. Kralkina, A. A. Rukhadze, P. A. Nekliudova, V. B. Pavlov, A. K. Petrov, and K. V. Vavilin, *AIP Advances*, **8**, 035217 (2018).