

Волновая структура, возбуждаемая в плазме цилиндрического индуктивного источника с внешним магнитным полем

Е. А. Кралькина, А. М. Никонов

Экспериментально показано, что при достижении ВЧ-генератором мощности 500 Вт и магнитных полях более 10 Гс в цилиндрическом индуктивном источнике плазмы с внешним магнитным полем формируется волновая структура. В области расположения антенны продольная составляющая ВЧ магнитного поля достигает максимума у стенок источника плазмы, в то время как на расстояниях от антенны более 10 см максимум поля наблюдается на оси источника. Одновременно по мере удаления от антенны формируется явно выраженный пик радиального распределения зондового ионного тока насыщения на оси источника плазмы.

Ключевые слова: геликонный разряд, индуктивно-связанная плазма, магнитные зонды.

Введение

Технологии, основанные на применении различных газовых разрядов, используются в самых разных отраслях современной индустрии, начиная от полупроводниковой промышленности, где газовый разряд используется для модификации и травления поверхности материалов [1], и заканчивая космическими технологиями, где газоразрядная плазма используется в качестве рабочего тела электрореактивного двигателя, причем именно поток ионов которого создаёт реактивную тягу [2, 3]. Частным случаем газового разряда является индуктивный ВЧ-разряд, который находит своё применение практически во всех указанных областях. При этом особый интерес представляет индуктивный ВЧ-разряд во внешнем магнитном поле, позволяющий получить плазму высокой плотности с минимальными энергетическими затратами [4].

Известно, что в обычном индуктивном ВЧ-разряде электромагнитные поля сканируются и не проникают вглубь плазмы. Наложение внешнего магнитного поля, индукция которого соответствует областям резонансного поглощения ВЧ-мощности, сопровождается появлением областей прозрачности, где ВЧ-поля уже проникают вглубь плазмы и

эффективно нагревают электроны [5]. В литературе подобный разряд получил название «геликонного» [4, 6, 7]. В настоящее время принята точка зрения, что в «геликонном» разряде происходит возбуждение геликонной и косой ленгмюровской волны, причем поглощение ВЧ-мощности в разряде при низких давлениях происходит вследствие черенковского механизма поглощения энергии косой ленгмюровской волны [8–12].

Теоретическое рассмотрение проблемы сделано в предположении о постоянстве плотности электронов в источнике плазмы и в пренебрежении заряда, генерируемого реальными антеннами на поверхности источника. В связи с этим большое значение имеет экспериментальное изучение структуры волн [13–23], возбуждаемых при типичных для работы современных технологических устройств параметрах разряда.

В настоящее время основной объем исследований, выполненный в литературе [13–22], соответствует высоким величинам индукции внешнего магнитного поля и ВЧ-мощности, при которой концентрация электронов достигает величин порядка $5 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$, а частота электрон-ионных соударений превышает величину kv_{Te} , характеризующую бесстолкновительное поглощение (k – волновое число, v_{Te} – тепловая скорость электронов). Высокая частота электрон-атомных или электрон-ионных столкновений приводит к понижению роли косой ленгмюровской волны и снижению эффективности поглощения ВЧ-мощности плазмой.

В последние годы наметилась тенденция использования индуктивного ВЧ-разряда с внешним магнитным полем в плазменных технологиях при относительно небольших значениях ВЧ-мощности

Кралькина Елена Александровна, ведущий научный сотрудник, д.ф.-м.н.

Никонов Александр Михайлович, аспирант.
 МГУ им. М. В. Ломоносова (Физический факультет).
 Россия, 111991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2.
 Тел. +7(495) 939-47-73.
 E-mail: ekralkina@mail.ru; nikonov.207@mail.ru

Статья поступила в редакцию 4 октября 2017 г.

и индукции внешнего магнитного поля, т. е. в области параметров плазмы, при которых бесстолкновительное поглощение ВЧ-мощности является доминирующим процессом. Однако систематические исследования структуры волн, возбуждаемых при указанных выше условиях, в литературе отсутствуют.

В связи с вышесказанным, в настоящей работе была поставлена задача изучить структуру волн, возбуждаемых в источнике плазмы при значениях магнитного поля 10–60 Гс и мощностях ВЧ-генератора до 1000 Вт.

В отличие от работ [13–22], в настоящем эксперименте была использована соленоидальная антенна, которая должна приводить к возбуждению азимутально симметричных волн [24].

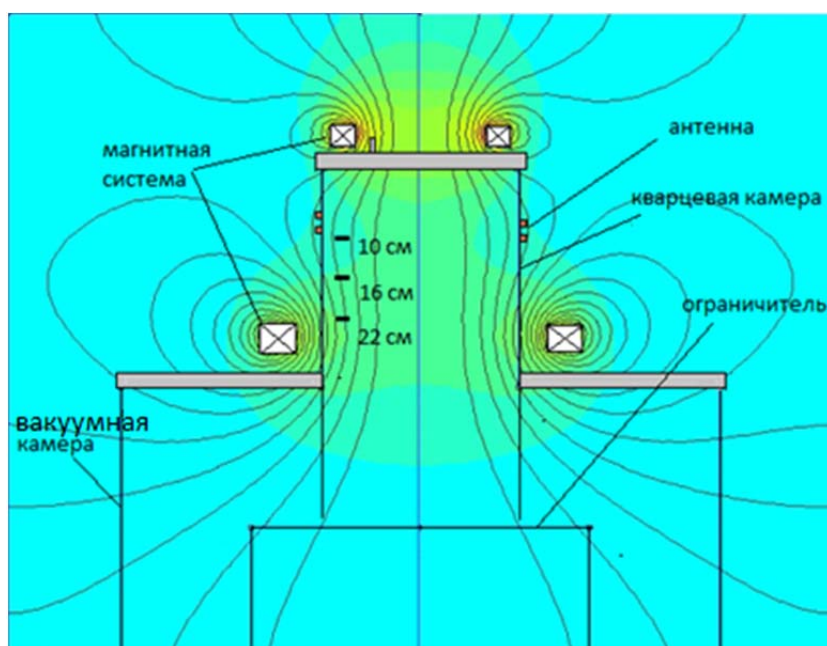


Рис. 1. Схема источника плазмы и распределение магнитных силовых линий.

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 изменяется в диапазоне от 0 до 1000 Вт. Ток антенны измерялся с помощью пояса Роговского.

Внешнее магнитное поле создается при помощи электромагнитов–катушек, расположенных вокруг источника плазмы. Один из магнитов (см. рис. 1) находится в области верхнего фланца газоразрядной камеры, второй лежит на верхнем фланце металлической камеры. Выбранная конфигурация магнитов обеспечивает равномерность линий магнитного поля в области расположения антенны в пределах ~ 10 %. Исследованный диапазон изменения индукции внешнего магнитного

Экспериментальная установка и методики измерений

Схема источника плазмы представлена на рис. 1. Источник состоит из кварцевого цилиндра диаметром 20 и высотой 42 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, ограничивающий разряд. В данной работе исследовалась конфигурация разряда длиной 40 см.

поля составляет 10–60 Гс. В нижней части источника плазмы магнитное поле является слабосходящимся.

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

Основное внимание в работе было уделено исследованию волновой структуры в источнике плазмы, возникающей при наложении на разряд внешнего магнитного поля. Для этого измерялась продольная компонента B_z магнитного ВЧ-поля.

Измерения продольной составляющей высокочастотного магнитного поля B_z проводились при помощи магнитного зонда, введенного внутрь плазмы. Зонд представлял собой небольшую катушку, состоящую из 10–15 витков диаметром 2 мм и помещенную в стеклянный кожух, примы-

кающий к заземлённой медной трубке. Через неё провода выводились за пределы газоразрядной камеры. На выходе из индуктора провода переплетались и пропускались через фторопластовую трубку для дополнительной изоляции от стенок медной трубки. Для минимизации высокочастотных емкостных наводок на провода пояса Роговского в цепь была включена трансформаторная развязка, центральная часть (средняя точка) которой были заземлена, а провода, идущие от концов используемого диагностического зонда, переплетены. В результате емкостные наводки на провода одинаковой длины ведут к образованию равных по амплитуде, но противоположных по знаку токов. Они друг друга компенсируют, а на вторичную обмотку трансформатора попадает только полезный сигнал. В качестве сердечника трансформаторной развязки использовалось ферритовое кольцо, на две стороны которого были намотаны провода, подсоединённые к зонду и измерительной электрической цепи соответственно. После развязки сигнал по изолированному ВЧ-кабелю поступал на осциллограф. Сама развязка была помещена в заземлённый стальной корпус для исключения ВЧ-наводок внутри цепи.

Магнитный зонд мог перемещаться как вдоль оси (на расстояниях $z = 8\text{--}25$ см от верхнего фланца), так и по радиусу источника плазмы. Все радиальные измерения были проведены на расстояниях 10, 15, 19 и 25 см от верхнего фланца газоразрядной камеры. В процессе экспериментов измерялась амплитуда сигнала магнитного зонда, а также разность фаз между исследуемым сигналом и постоянным сигналом с антенны.

Волновая структура тесно связана со значениями и пространственным распределением концентрации электронов [13]. В связи с этим дополнительно измерялись радиальные распределения зондового тока насыщения, который пропорционален плотности плазмы. Методика измерения заключается в регистрации зондового ионного тока насыщения при постоянном приложенном напряжении. Простейшая электрическая схема для измерения ионного тока включает в себя следующие компоненты: измерительный зонд, фильтр для подавления составляющих зондового тока, микроамперметр, а также регулируемый источник напряжения смещения зонда.

Измерения пространственного распределения дополнительно были направлены на оценку возможности получения однородной плазмы вблизи подложки, что важно для нахождения оптимальных конфигураций источников плазмы, предназначенных для технологических применений.

Исследования проводились в аргоне в диапазоне давлений от 2×10^{-6} Торр до 6×10^{-3} Торр.

Результаты и их обсуждение

Основная задача работы состояла в определении природы и структуры волн, образующихся в плазме высокочастотного индуктивного ВЧ-разряда во внешнем магнитном поле. Мощность, подаваемая генератором, и индукция внешнего магнитного поля соответствуют диапазону частот $\omega_{L1} \ll \omega \ll \ll \Omega_e \ll \omega_{Le}$, что соответствует области возбуждения связанных косых ленгмюровских и геликонных волн.

На рис. 2 показаны типичные аксиальные распределения продольной составляющей B_z магнитного ВЧ-поля, измеренные при различных мощностях ВЧ-генератора. Эксперименты показали, что при достижении ВЧ-генератором мощности 500 Вт даже при наименьшем из рассмотренных значений магнитного поля, а именно, 13 Гс начинает отчетливо проявляться волновая структура. На оси источника плазмы наблюдаются три локальных максимума B_z . Основным максимум поля лежит вблизи центрального сечения источника.

На рис. 3 показаны типичные радиальные распределения B_z . При всех рассмотренных в настоящей работе параметрах разряда в области нижней части антенны поле B_z достигает максимума вблизи стенок источника плазмы и быстро спадает при продвижении к оси источника плазмы. По мере удаления от антенны поле B_z начинает проникать вглубь плазмы, образуя максимум на оси источника. Данные результаты в целом повторяемы при всех значениях мощности ВЧ-генератора, а также при различных значениях индукции внешнего магнитного поля.

Результаты измерения разности фаз $\Delta\varphi$ между сигналом с магнитного зонда и опорным сигналом (током антенны) представлены на рис. 4. В области антенны наблюдается случайный разброс значений, однако в областях ниже антенны фаза при увеличении z от 10 до 30 см изменяется на 180 градусов. Таким образом, длина волны, которая возбуждается в источнике плазмы, близка к 40 см, а ее фазовая скорость составляет величину $5,5 \times 10^8$ см/с. Близкие значения были получены в работе [20].

Из рис. 4 видно, что изменение фазы волны в области $z > 30$ см замедляется. Здесь же формируется локальный максимум поля B_z . Указанные эффекты могут быть связаны с формированием на границе разряда отраженной волны, распространяющейся в направлении антенны [23] и затухающей по мере приближения к антенне. Необходимо отметить, что еще один локальный максимум формируется вблизи верхнего фланца при $z \sim 5$ см. Его появление может быть связано с наличием отраженной волны от верхнего фланца.

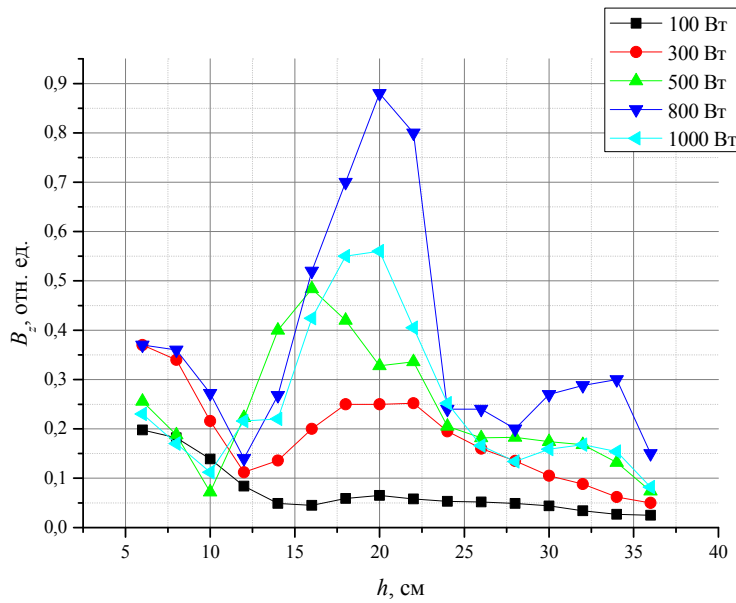


Рис. 2. Аксиальное распределение составляющей магнитной индукции B_z при различных значениях мощности генератора. Внешнее магнитное поле 53 Гс.

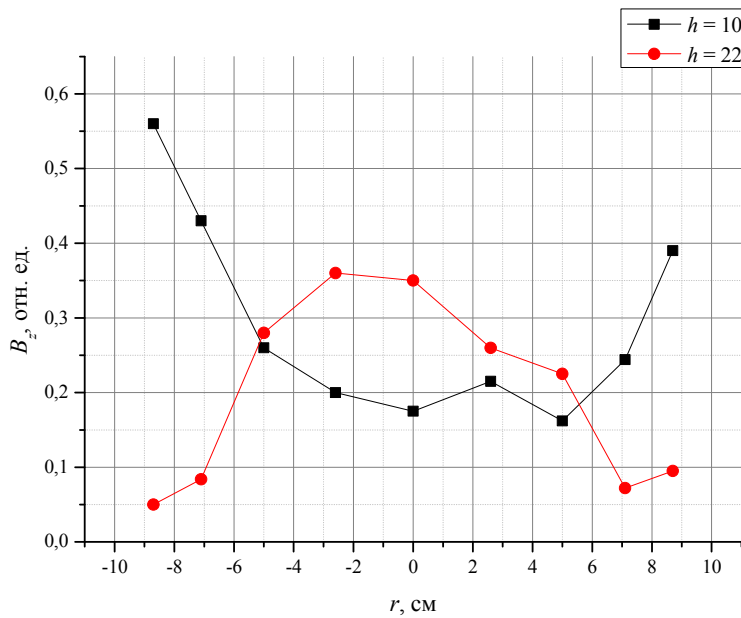


Рис. 3. Радиальные распределения составляющей B_z при мощности 300 Вт и значениях индукции внешнего магнитного поля 40 Гс в двух фиксированных точках 10 см и 22 см.

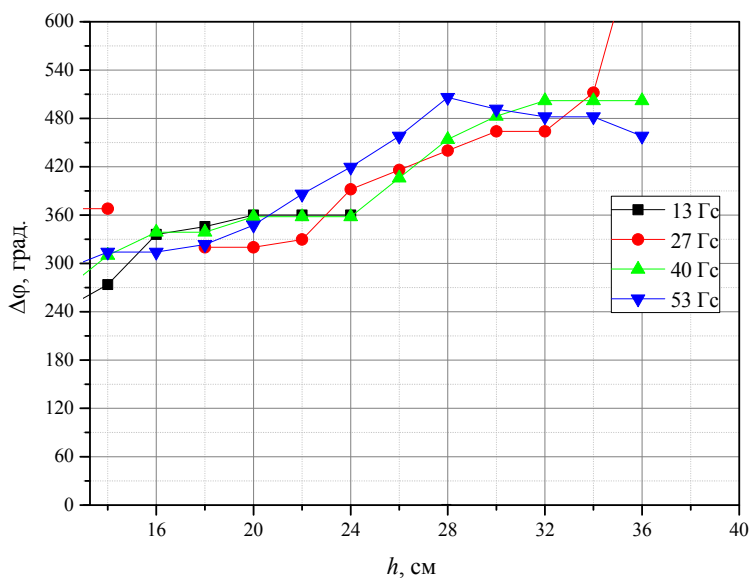


Рис. 4. Аксиальное распределение разности фаз для B_z при различных магнитных полях и фиксированной мощности 500 Вт.

Измерения пространственного распределения зондового ионного тока насыщения показали, что наиболее равномерное распределение наблюдается вблизи оси источника плазмы. Это видно из приведенной таблицы, где представлены размеры области равномерности в пределах 10 % ионного тока в зависимости от индукции внешнего магнитного поля и расстояния от верхнего фланца. По мере удаления от антенны радиальное распределение ионного тока приобретает ярко выраженный пик на оси источника, что, по-видимому, связано с проникновением ВЧ-полей в объем плазмы. Вблизи антенны, наилучшая равномерность плазмы достигается при индукции внешнего магнитного поля в 40 Гс. При $z = 19\text{--}25$ см наиболее равномерное распределение ионного тока достигается при магнитном поле 27 Гс. При дальнейшем увеличении магнитного поля размер области постепенно сокращается до совсем незначительных величин.

Таблица

Области равномерного распределения в пределах 10 % по радиусу источника плазмы на высотах 10, 15, 19 и 25 см.
 $P_{gen} = 500 \text{ Вт}$

В, Гс	0 Гс	13 Гс	27 Гс	40 Гс	53 Гс
$h = 11$ см	12 см	16 см	17 см	18 см	5 см
$h = 15$ см	10 см	11 см	11 см	16 см	4 см
$h = 19$ см	6 см	8 см	10 см	4 см	4 см
$h = 25$ см	10 см	10 см	8 см	7 см	3 см

Заключение

Эксперименты показали, что цилиндрическом индуктивном источнике плазмы длиной 40 см формируется волновая структура при достижении ВЧ-генератором мощности 500 Вт и магнитных полях более 10 Гс. Увеличение индукции внешнего магнитного поля сопровождается смещением положения максимума амплитуды B_z вдоль оси источника от области вблизи нижней части антенны к центральной области разряда. На расстояниях 5 и 25–30 см от верхнего фланца источника плазмы формируются локальные максимумы поля B_z . Фазовая скорость исследуемой волны в области $z = 16\text{--}28$ см составляет величину $5,5 \times 10^8$ см/с.

Наиболее равномерное распределение ионного тока насыщения наблюдается вблизи оси источника плазмы. По мере удаления от антенны радиальное распределение ионного тока приобретает ярко выраженный пик на оси источника, что

связано с проникновением ВЧ-полей в объем плазмы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Stephen M., Rossnagel William D., Westwood Jerome J., Cuomo, Handbook of Plasma Processing Technology. 1st Edition Fundamental, Etching, Deposition and Surface Interactions, (eBook ISBN: 9780815517641, 1990).
2. Mazouffre S. // Plasma Sources Sci. Technol. 2016. Vol. 25. P. 235.
3. Goebel D. M., Katz I. Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters. (Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology, 2008).
4. Chen F. F. Helicon Plasma Sources, in Book: High Density Plasma Sources. Edited by O. A. Popov, pp. 1–75, (1996).
5. Гинзбург В. Л., Рухадзе А. А. Волны в магнитоактивной плазме. – Наука, 1970.
6. Chen F. F., Chevalier G. // J. Vac. Sci. Technol. A, 1992. Vol. 10. P. 1389.
7. Chen Niu, Gao Zhao, Yu Wang, Zhongwei Liu, Qiang Chen. // Physics of Plasmas. 2017. Vol. 24. P. 013518.
8. Shamrai K. P., Taranov V. B. // Plasma Phys. Control. Fusion. 1994. Vol. 36. P. 1719.
9. Александров А. Ф., Воробьев Н. Ф., Кралькина Е. А., Обухов В. А., Рухадзе А. А. // ЖТФ. 1994. Т. 64. Вып. 11. С. 53.
10. Александров А. Ф., Бугров Г. Э., Вавилин К. В., Керимова И. К., Кондранин С. Г., Кралькина Е. А., Павлов В. Б., Плаксин В. Ю., Рухадзе А. А. // Физика плазмы. 2004. Т. 30. № 5. С. 434.
11. Вавилин К. В., Рухадзе А. А., Пу М. Х., Плаксин В. Ю. // ЖТФ. 2004. Т. 74. Вып. 5. С. 44.
12. Кралькина Е. А. // Успехи физических наук. 2008. Т. 178. № 5. С. 519.
13. Aliev Yu. M., Krämer M. // Physics of Plasmas. 2016. Vol. 23. P. 472.
14. Tysk S. M., Denning M. C., Scharer J. E., Akhtar K. // Physics of Plasmas. 2003. Vol. 11. P. 923.
15. Boswell R. W. Modulated RF produced argon magneto-plasma / School of Physical Sciences, The Flinders University of South Australia, Internal Rep. PR 68/8, (1968).
16. Plasma production using a standing helicon wave // Phys. Lett. 1970. Vol. 33A. P. 457.
17. Boswell R. W. // Plasma Phys. Controlled Fusion. 1984. Vol. 26. P. 1147.
18. Degening A. W., Jung C. O., Boswell R. W., Ellingboe A. R. Plasma production from helicon waves / Space Plasma & Plasma Processing Group, Plasma Research School of Physical Sciences and Engineering, (1996).
19. Chang L., Hole M. J., Caneses J. F., Chen G., Blackwell B. D. Corr C. S. // Physics of Plasmas. 2012. Vol. 19. P. 083511.
20. Chen Niu, Gao Zhao, Yu Wang, Zhongwei Liu, Qiang Chen. // Physics of Plasmas. 2017. Vol. 24. P. 013518.
21. Lee C. A., Chen G., Arefiev A. V., Bengtson R. D., Breizman B. N. // Physics of Plasmas. 2011. Vol. 18. P. 013501.
22. Franck Ch. M., Grulke O., Stark A., Klinger T., Scime E. E., Bonhomme G. // Plasma Sources Sci. Technol. 2005. Vol. 14. P. 226.
23. Петров А. К. Диссертация «Физические процессы в двухкамерном высокочастотном индуктивном источнике плазмы, помещённом во внешнее магнитное поле». 2016.
24. Shamrai K. P., Pavlenko V. P., Taranov V. B. // Plasma Physics and Controlled Fusion. 1997. Vol. 39. P. 3.

Wave structure excited in the plasma of the cylindrical inductive plasma source with an external magnetic field

E. A. Kralkina and A. M. Nikonov

Lomonosov Moscow State University (Department of Physics)
Bld. 2, 1 Leninskie Gory, 111991, Moscow, Russia
E-mail: ekralkina@mail.ru; nikonov.207@mail.ru

Received October 4, 2017

It is experimentally shown, that the wave structure is formed in plasma source with external magnetic field at RF power more than 500 W and magnetic fields more than 10 Gs. The axial component of RF magnetic field achieve maximum near the walls of plasma source in the antenna area, while 10 cm below the antenna area the maximum is located on the axis of the plasma source. Simultaneously the explicit peak of ion current distribution is formed on the plasma source axis in process of downward movement from antenna region.

Keywords: helicon discharge, inductive coupled plasma, magnetic probes.

REFERENCES

1. Stephen M. Rossmagel William D. Westwood Jerome J. Cuomo, *Handbook of Plasma Processing Technology 1st Edition Fundamental, Etching, Deposition and Surface Interactions*, (eBook ISBN: 9780815517641, 1990).
2. S. Mazouffre, *Plasma Sources Sci. Technol.* **25**, 235(2016).
3. Dan M. Goebel and Ira Katz, *Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters*. (Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology, 2008).
4. F. F. Chen, *Helicon Plasma Sources*, in Book: *High Density Plasma Sources*. Ed. Oleg A. Popov (1996).
5. V. L. Gimsburg and A. A. Ruhadze, *Waves in Magnetoactive Plasma* (Nauka, Moscow, 1970) [in Russian].
6. F. F. Chen and G. Chevalier, *J. Vac. Sci. Technol. A*, **10**, 1389 (1992).
7. Chen Niu, Gao Zhao, Yu Wang, Zhongwei Liu, Qiang Chen, *Physics of Plasmas* **24**, 013518 (2017).
8. K. P. Shamrai and V. B. Taranov. *Plasma Phys. Control. Fusion* **36**, 1719 (1994).
9. A. F. Alexandrov, N. F. Vorobiev, E. A. Kralkina, V. A. Obukhov, and A. A. Ruhadze. *Tech. Phys.* **64** (11), 53 (1994).
10. A. F. Aleksandrov, G. E. Bugrov. K. V. Vavlin, I. K. Kerimova, S. G. Kondranin, E. A. Kralkina, V. B. Pavlov, V. Yu. Plaksin, and A. A. Ruhadze, *Plasma Physics Reports* **30** (5), 434 (2004).
11. K. V. Vavilin, A. A. Ruhadze, M. H. Ri, and V. Yu. Plaksin, *Tech. Phys.* **74** (5), 44 (2004).
12. E. A. Kralkina. *Phys. Usp.* **178** (5), 519 (2008).
13. Yu. M. Aliev and M. Krämer, *Physics of Plasmas* **23**, 472 (2016).
14. S. M. Tysk, C. M. Denning, J. E. Scharer, and K. Akhtar, *Physics of Plasmas* **11**, 923 (2003).
15. R. W. Boswell, *Modulated RF produced argon magneto-plasma* (School of Physical Sciences, The Flinders University of South Australia, Internal Rep. PR **68/8**, 1968).
16. *Plasma production using a standing helicon wave*, *Phys. Lett.* **33A**, 457 (1970).
17. R. W. Boswell, *Plasma Phys. Controlled Fusion* **26**, 1147 (1984).
18. A. W. Degening, C. O. Jung, R. W. Boswell, and A. R. Ellingboe, *Plasma production from helicon waves* (Space Plasma & Plasma Processing Group, Plasma Research School of Physical Sciences and Engineering, 1996).
19. L. Chang, M. J. Hole, J. F. Caneses, G. Chen, B. D. Blackwell, and C. S. Corr, *Physics of Plasmas* **19**, 083511 (2012).
20. Chen Niu, Gao Zhao, Yu Wang, Zhongwei Liu, and Qiang Chen, *Physics of Plasmas* **24**, 013518 (2017).
21. C. A. Lee, G. Chen, A. V. Arefiev, R. D. Bengtson, and B. N. Breizman, *Physics of Plasmas* **18**, 013501 (2011).
22. Ch. M. Franck, O. Grulke, A. Stark, T. Klinger, E. E. Scime, and G. Bonhomme, *Plasma Sources Sci. Technol.* **14**, 226 (2005).
23. A. K. Petrov, Dissertation, (2016).
24. K. P. Shamrai, V. P. Pavlenko, and V. B. Taranov, *Plasma Physics and Controlled Fusion* **39**, 3 (1997).