

Физические процессы в маломощном индуктивном источнике плазмы в слабом внешнем магнитном поле

Ф. И. Ивандиков, И. И. Задириев, Е. А. Кралькина

Исследовано влияние внешнего магнитного поля с индукцией менее 150 Гс на картину вложения мощности в маломощный индуктивный разряд и на структуру продольных ВЧ-полей в плазме разряда. Показано, что вложение ВЧ-мощности в разрядную плазму, а также распределения амплитуды и фазы продольной компоненты магнитного ВЧ-поля вдоль оси системы немонотонно зависят от величины магнитного поля.

Ключевые слова: индуктивный разряд, геликонный источник плазмы, волновые процессы в плазме.

DOI: 10.51368/1996-0948-2021-5-38-43

Введение

В последние годы в литературе появилось большое количество работ, посвященных изучению характеристик высокочастотных (ВЧ) источников плазмы с внешним магнитным полем, позволяющих получать на выходе скомпенсированный электронами поток ускоренных ионов [1].

Интерес к указанным источникам, часто в литературе [1, 2] именуемым геликонными, обусловлен целым рядом причин. Во-первых, при определенных резонансных значениях магнитного поля ВЧ-поля проникают вглубь плазмы и эффективно нагревают электроны. При этом концентрация плазмы возрастает по сравнению с индуктивным разрядом без магнитного поля и достигает значений порядка

10^{12} – 10^{13} см⁻³ при мощностях ВЧ-генератора порядка 1 кВт [1–3]. Во-вторых, средняя энергия ионов в потоке плазмы, исходящем из источника, может достигать 70 эВ. В-третьих, подобные источники не требуют эмитирующего катода для своей работы и не имеют находящихся в контакте с плазмой металлических элементов. Эти факторы делают геликонные источники перспективными кандидатами для использования в таких технологиях, как:

- поверхностная модификация материалов;
- напыление тонких пленок с ионным ассистированием, где энергия потока ионов недостаточна для интенсивного распыления растущих пленок, а, кроме того, скомпенсированность ионного потока электронами позволяет избежать зарядки обрабатываемой поверхности;
- электроракетные двигатели (ЭРД), причем в этом случае ускоренный поток ионов используется для создания реактивной тяги.

Типичная конструкция геликонного источника включает в себя диэлектрическую цилиндрическую газоразрядную камеру (ГРК), на внешней поверхности которой располагается антенна-индуктор. Рабочий газ подается через один торец ГРК, второй торец открыт и через него происходит истечение

Ивандиков Фёдор Игоревич^{1,2}, магистр.

E-mail: ivandikov.fi15@physics.msu.ru

Задириев Илья Игоревич¹, инженер, к.ф.-м.н.

Кралькина Елена Александровна¹, в.н.с., д.ф.-м.н.

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

Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1.

²Московский Технический Университет Связи и Информатики.

Россия, 111024, Москва, улица Авиамоторная, 8а.

Статья поступила в редакцию 15 июля 2021 г.

© Ивандиков Ф. И., Задириев И. И., Кралькина Е. А., 2021

плазмы. ГРК вместе с антенной помещается внутрь соленоида, который создает в основном объеме ГРК постоянное магнитное поле с преимущественно продольной компонентой. Геометрия силовых линий магнитного поля на выходе из ГРК устанавливается расходящейся для организации более эффективного ускорения плазмы за счёт эффекта «магнитного сопла» [3, 4]. Величина магнитного поля подбирается исходя из условий возбуждения в разряде геликонных и косых ленгмюровских волн [5, 6].

Существующие в настоящее время геликонные источники можно условно разделить на две группы по их внешним параметрам. К первой группе следует отнести традиционные геликонные источники с длинами ГРК порядка 1 м, ВЧ-мощностями более 1 кВт и магнитными полями с индукцией около 1 кГс [7, 8]. Их применение ориентировано, прежде всего, на космические технологии. Ко второй группе относятся геликонные источники малых размеров [9] с длинами и диаметрами ГРК порядка 10 и 5 см соответственно. Для них характерны значения ВЧ-мощности до 300 Вт и индукции внешнего магнитного поля около 100 Гс. Маломощные источники могут применяться в указанных выше наземных технологиях. Кроме того, они являются перспективными кандидатами на роль электрических ракетных двигателей для малых космических аппаратов на низких околоземных орбитах, где существенно присутствие газов верхних слоёв атмосферы.

Настоящая статья посвящена экспериментальному исследованию особенностей вложения ВЧ-мощности и волновой структуры, образующейся в модифицированном малогабаритном геликонном источнике.

Экспериментальная установка и методики измерений

Схема исследованного лабораторного геликонного источника малой мощности изображена на рис. 1. ГРК источника выполнена из кварцевого стекла. Она состоит из двух сопряженных частей: первой – цилиндрической с диаметром 42 мм и длиной 100 мм и второй – имеющей форму усеченного конуса с выходным отверстием диаметром 25 мм. Газовод расположен на верхнем торце ГРК.

Он снабжён газораспределителем, который перенаправляет поток рабочего газа на верхний торец ГРК для увеличения времени жизни атомов в рабочем объеме. Магнитная система состоит из одного электромагнита, расположенного около выходного отверстия, так что магнитное поле в этом районе является продольным и становится расходящимся при углублении в ГРК или выходе из неё. Индукция магнитного поля падает от сужающегося отверстия к газораспределителю приблизительно в 2,5 раза.

Геликонный источник размещался на фланце вакуумной камеры объёмом приблизительно 0,7 м³. В вакуумной камере на подвижной каретке, способной перемещаться вдоль направления оси лабораторного источника, размещалось диагностическое оборудование, представленное четырёхсеточным энергоанализатором, скомпенсированным ВЧ-зондом Ленгмюра и магнитным зондом.

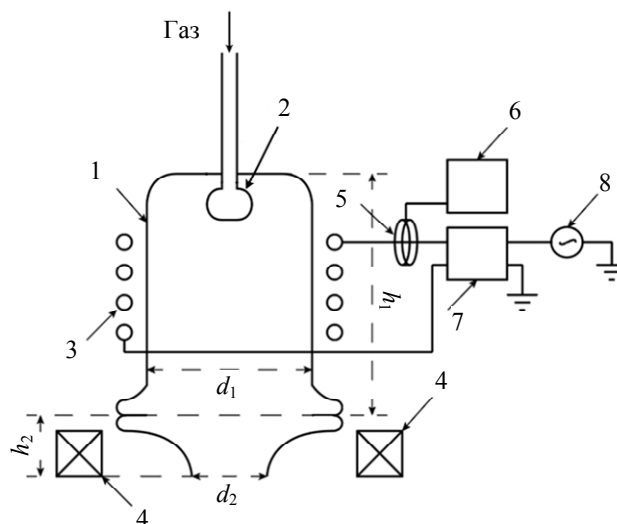


Рис. 1. Схема ГРК источника: 1 – газоразрядная камера; 2 – газораспределитель; 3 – антенна; 4 – электромагнит; 5 – пояс Роговского; 6 – осциллограф; 7 – система согласования; 8 – ВЧ-генератор. Размеры ГРК: $h_1=100$ мм, $h_2=28$ мм, $d_1=42$ мм, $d_2=25$ мм.

Вложение ВЧ-мощности P_{dis} в разряд определялось исходя из показаний тока, протекающего через индуктор в присутствии разряда и без него, на основании уравнений:

$$P_{gen} = P_{dis} + I^2 R_a$$

$$P_{gen}^* = I_0^2 R_a$$

где P_{gen} – подводимая к разряду ВЧ-мощность; R_a – сопротивление антенны-индуктора и под-

водящих проводов; I – ток через антенну; P_{gen}^* – мощность ВЧ-источника питания при незажжённом разряде; I_0 – ток через антенну при незажжённом разряде.

Токи I , I_0 измерялись при помощи пояса Роговского, подключенного к электрической схеме разряда так, как это показано на рис. 1. Подробно указанный метод измерения вложенной в разряд ВЧ-мощности описан в [11–13].

При помощи зонда Ленгмюра производились измерения концентрации плазмы и температуры электронов, а при помощи магнитного зонда определялось распределение амплитуды и фазы продольной компоненты магнитного ВЧ-поля вдоль оси системы. Характеристики испускаемого лабораторным источником потока заряженных частиц исследовались при помощи четырёхсеточного энергоанализатора. Экспериментальное исследование проводилось при следующих внешних параметрах:

Подводимая к разряду ВЧ-мощность: 100–200 Вт

Частота ВЧ-генератора: 13,56 МГц

Индукция магнитного поля: 0–120 Гс

Расход рабочего газа: 12 мл/мин

Рабочий раз: аргон

Давление в вакуумной камере во время работы источника: 4×10^{-4} Торр.

Результаты

На рис. 2 представлена зависимость эффективности вложения ВЧ-мощности в плазму. Видно, что зависимость немонотонна и имеет выраженный максимум, положение которого смещается при изменении подводимой к разряду ВЧ-мощности. При этом вложение на магнитных полях, меньших тех, что соответствуют области максимумов, не зависит от ВЧ-мощности. Когда же магнитное поле превышает определённую величину (около 60 Гс в настоящем эксперименте), то зависимость вложения от ВЧ-мощности становится ярко выраженной. Такое поведение также наблюдалось в работах других авторов [14, 15]. Немонотонность вложения мощности может являться следствием изменения эквивалентного сопротивления разряда из-за возбуждения в разрядной плазме волн [14–16]. Для прояснения этого вопроса были выполнены измерения

амплитуды и фазы магнитного ВЧ-поля вдоль оси источника с помощью магнитного зонда, результаты которых представлены на рис. 3.

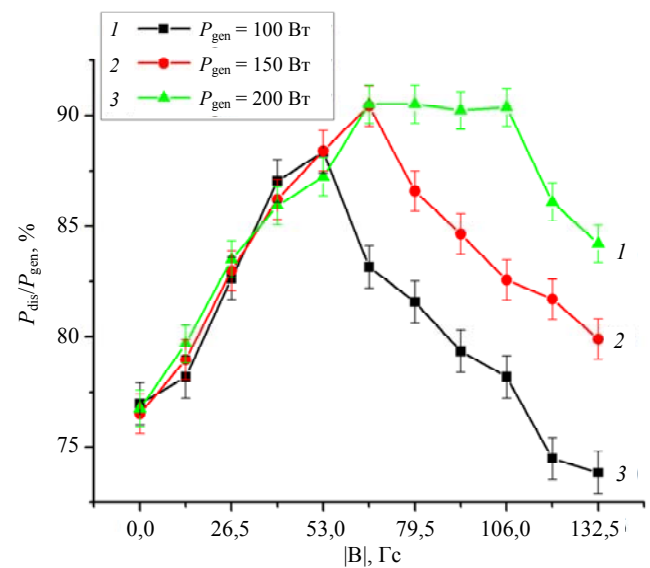


Рис. 2. Зависимость отношения мощности, вкладываемой в плазму P_{dis} к мощности ВЧ-генератора P_{gen} от индукции внешнего магнитного поля. $|B|$ – индукция магнитного поля в области сужающегося выходного отверстия.

Как видно из рис. 3, в условиях отсутствия внешнего магнитного поля и при слишком больших полях, где пик вложения уже пройден, амплитуда ВЧ-полей значительно меньше, чем в зоне, где вложение максимально. Также наблюдается изменение характера распределения с добавлением внешнего магнитного поля: бóльший пик амплитуды смещается к выходному отверстию источника, у антенны образуется второй пик, основная часть которого находится глубже зоны досягаемости зонда. Характер распределения фазы с добавлением внешнего магнитного поля также меняется. Монотонное убывание фазы по мере приближения к сужению в отсутствие внешнего магнитного поля меняется на резкий скачок фазы при наличии магнитного поля. Однако полученная фазовая картина в целом не соответствует виду, характерному для бегущей или стоячей волны. Отметим, что исследовалась только продольная компонента магнитного ВЧ-поля на оси системы. Малый радиус лабораторного источника не позволяет произвести измерения для азимутальной и радиальной компонент, которые могли бы существенно уточнить картину волновых процессов в ГРК или указать на их отсутствие.

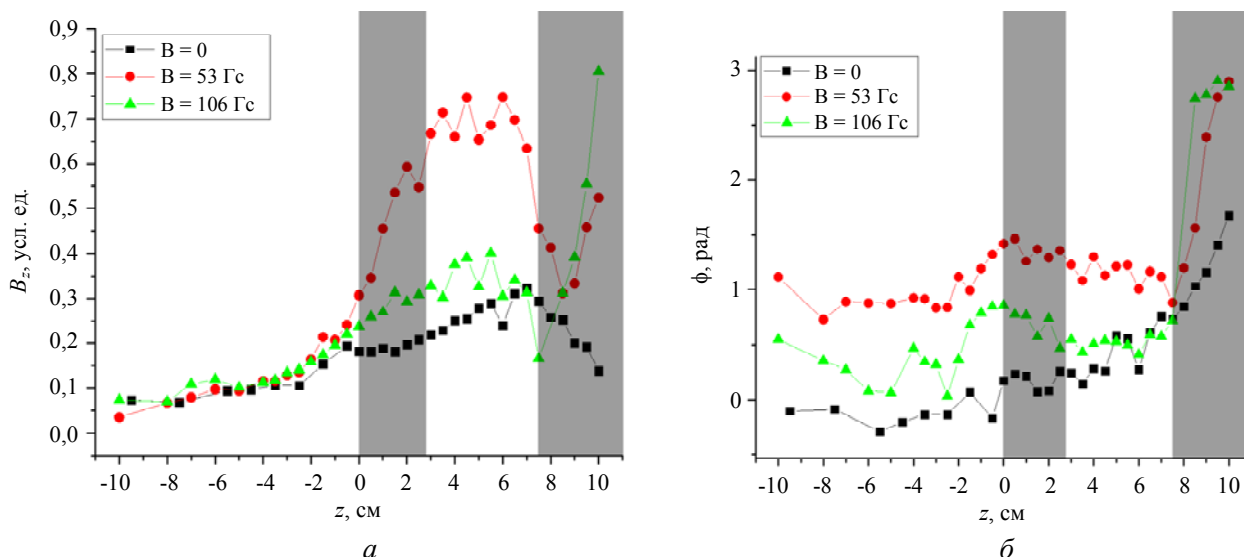


Рис. 3. Пространственное распределение амплитуды V_z (а) и фазы ϕ (б) магнитного ВЧ-поля вдоль оси источника z . Положительные значения z соответствуют положению зонда внутри ГРК, отрицательные – вне источника. Тёмные регионы указывают положение сужения ($z = 0$ см) и антенны ($z = 8$ см).

Если же принять допущение, что два пика амплитуды внутри ГРК и скачок фазы в зоне минимума амплитуды (скачок по величине меньше, чем π) соответствуют частично стоячей волне, заключённой между торцом ГРК с газораспределителем и скачком плотности плазмы в районе сужающегося отверстия, то подобная волна должна иметь продольное волновое число около $0,4 \text{ см}^{-1}$ и продольную фазовую скорость $2,13 \times 10^6 \text{ м/с}$. Близость фазовой скорости к тепловым скоростям электронов плазмы указывает на возможность взаимодействия электронной компоненты с волной, что могло бы объяснить появление потока электронов на выходе из ГРК.

Измерения параметров плазмы скомпенсированным ВЧ-зондом Ленгмюра, выполненные при магнитных полях, соответствующих максимуму вложения мощности, показали, что плотность плазмы внутри ГРК составляет величину порядка $4 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$ при мощности ВЧ-генератора 150 Вт, а электронная температура – 7 эВ. При выходе из ГРК плотность плазмы падает на порядок в пределах 2 см от сужающегося отверстия. Средний за период ВЧ-колебаний потенциал пространства у плазмы внутри ГРК равен 40–60 В.

При всех рассмотренных условиях экспериментов, включая разряд без магнитного поля, плазма присутствует не только внутри ГРК, но и в вакуумной камере, однако поток ускоренных ионов и электронов из источника появляется только при индукциях магнитного

поля около 7 Гс и выше. Средние энергии ионов в потоке слабо зависят от величины магнитного поля и ВЧ-мощности, и находятся в диапазоне 40–50 эВ, что примерно соответствует среднему за ВЧ-период потенциалу пространства внутри ГРК. Примечательно, что в присутствии магнитного поля также регистрируется выход электронов из ГРК со средними энергиями 20–30 эВ, зависящими от величины внешнего магнитного поля, хотя разность потенциалов между областями внутри ГРК и непосредственно за сужающимся отверстием является замедляющей для электронов и существенно превосходит их температуру (примерно 40 В против 7 эВ).

Заключение

Эксперименты показали, вложение ВЧ-мощности в разрядную плазму немонотонно зависит от величины магнитного поля, а положение максимума вложения смещается в сторону больших магнитных полей при увеличении ВЧ-мощности, подводимой к разряду. Распределение амплитуды и фазы продольной компоненты магнитного ВЧ-поля вдоль оси системы также немонотонно меняется с увеличением индукции внешнего постоянного магнитного поля: в распределении амплитуды появляется минимум около положения ВЧ-антенны и соответствующий ему скачок в распределении фазы.

Формирование потока ускоренных заряженных частиц на выходе из лабораторного геликонного источника плазмы малой мощности без внешнего магнитного поля не происходит. При наличии магнитного поля средняя энергия выходящих ионов составляет 40–50 эВ и практически не зависит от его индукции.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Chen F. F.* // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2015. Vol. 24. P. 014001.
2. *Shinohara Shunjiro* // *Advances in Physics.* 2018. Vol. 3. P. 1420424.
3. *Takahashi K.* // *Rev. Mod. Plasma Phys.* 2019. Vol. 3. № 3. P. 3.
4. *LaFleur T.* // *Physics of Plasmas.* 2014. Vol. 21. P. 043507.
5. *Chen F. F., Arnush D.* // *Physics of Plasmas.* 1997. Vol. 4. P. 3411.
6. *Chen F. F., Arnush D.* // *Physics of Plasmas.* 1998. Vol. 5. P. 1239.
7. *Boswell R. W.* // *Plasma Physics and Controlled Fusion* 1984. Vol. 26. № 10. P. 1147.
8. *West M. D., Charles C., Boswell R. W.* // *Journal of Propulsion and Power.* 2008. Vol. 24. № 1. P. 134.
9. *Isayama Shogo, Shinohara Shunjiro, Hada Tohru* // *Plasma and Fusion Research.* 2008. № 13.
10. *Chen F. F., Evans D., Tynan G. R.* // *Plasma Sources Science and Technology.* 2001. Vol. 10. P. 236.
11. *Godyak V. A., Piejak R. B., Alexandrovich B. M.* // *Plasma Sources Sci. Technol.* 1994. Vol. 3. P. 169.
12. *Piejak R. B., Godyak V. A., Alexandrovich B. M.* // *Plasma Sources Sci. Technol.* 1992. Vol. 1. P. 179.
13. *Godyak V. A., Piejak R. B., Alexandrovich B. M.* // *J. Appl. Phys.* 1999. Vol. 85. P. 703.
14. *Kralkina E. A.* // *Phys. Uspekhi.* 2008. Vol. 51. № 5. P. 493.
15. *Alexandrov A. F., Bugrov G. E., Vavilin K. V., Kerimova I. F., Kondranin S. G., Kralkina E. A., Pavlov V. B., Plaksin V. Yu., Rukhadze A. A.* // *Plasma Phys. Rep.* 2004. Vol. 30. № 5. P. 398.
16. *Shamrai K. P., Virko V. F., Blom H. O.* // *Vac. Sci. Tech.* 1997. Vol. 15. P. 2864.

PACS: 52.75.-d, 52.80.Pi

Physical processes in a low-power inductive plasma source in the presence of a weak magnetic field

F. I. Ivandikov^{1,2}, I. I. Zadiriev¹, and E. A. Kralkina¹

¹Lomonosov Moscow State University
1 Leninskie Gory, 111991, Moscow, Russia
E-mail: ivandikov.fi15@physics.msu.ru

²Moscow Technical University of Communications and Informatics
8a Aviamotornaya st., Moscow, 111024, Russia

Received July 15, 2021

Research into the influence of a weak external magnetic field (<150 G) on the efficiency of power coupling to plasma and on the structure of axial RF fields in plasma is presented. Power coupling to the discharge plasma as well as the structure of the axial component of RF magnetic fields are shown to depend on the external magnetic field's magnitude in a non-monotous manner.

Keywords: inductively coupled discharge, helicon plasma source, wave phenomena in plasma.

DOI: 10.51368/1996-0948-2021-5-38-43

REFERENCES

1. F. F. Chen, *Plasma Sources Sci. Technol.* **24**, 014001 (2015).
2. Shunjiro Shinohara, *Advances in Physics* **3**, 1420424 (2018).
3. K. Takahashi, *Rev. Mod. Plasma Phys.* **3** (3), 3 (2019).
4. T. La Fleur, *Physics of Plasmas* **21**, 043507 (2014).
5. F. F. Chen and D. Arnush, *Physics of Plasmas* **4**, 3411 (1997).
6. F. F. Chen and D. Arnush, *Physics of Plasmas* **5**, 1239 (1998).
7. R. W. Boswell, *Plasma Physics and Controlled Fusion* **26**, 1147 (1984).
8. M. D. West, C. Charles, and R. W. Boswell, *Journal of Propulsion and Power* **24** (1), 134 (2008).
9. Isayama Shogo, Shinohara Shunjiro, and Hada Tohru, *Plasma and Fusion Research*, No. 13 (2008).
10. F. F. Chen, D. Evans, and G. R. Tynan, *Plasma Sources Science and Technology* **10**, 236 (2001).
11. V. A. Godyak, R. B. Piejak, and B. M. Alexandrovich, *Plasma Sources Sci. Technol.* **3**, 169 (1994).
12. R. B. Piejak, V. A. Godyak, and B. M. Alexandrovich, *Plasma Sources Sci. Technol.* **1**, 179 (1992).
13. V. A. Godyak, R. B. Piejak, and B. M. Alexandrovich, *J. Appl. Phys.* **85**, 703 (1999).
14. E. A. Kralkina, *Phys. Uspekhi* **51**, 493 (2008).
15. A. F. Alexandrov, G. E. Bugrov, K. V. Vavilin, I. F. Kerimova, S. G. Kondranin, E. A. Kralkina, V. B. Pavlov, V. Yu. Plaksin, and A. A. Rukhadze, *Plasma Phys. Rep.* **30**, 398 (2004).
16. K. P. Shamrai, V. F. Virko, and H. O. Blom, *Vac. Sci. Tech.* **15**, 2864 (1997).