

Поглощение мощности и волновая структура, возникающие в индуктивном высокочастотном источнике плазмы, помещенном в слабое внешнее магнитное поле

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

В настоящей работе изучены эффективность поглощения высокочастотной (ВЧ) мощности плазмой и структура возбуждаемых волн в индуктивных ВЧ-источниках плазмы (ИП) диаметром 20 см и длиной – 20, 32 и 52 см при наличии внешнего магнитного поля 10–65 Гс. Измерения выполнены в аргоне в диапазоне давлений 0,1–2,3 мТорр и мощностях ВЧ-генератора 0–1000 Вт. Для возбуждения индуктивного разряда использовалась соленоидальная антенна. Параллельно с индуктивным каналом в разряде был организован канал постоянного тока, сформированный двумя электродами, расположенными на торцах цилиндрического источника плазмы. Показано, что при давлении аргона менее 1 мТорр и мощностях ВЧ-генератора менее 800 Вт во всех трех рассмотренных ИП эффективность вложения ВЧ-мощности немонотонно зависит от магнитного поля. Измерение аксиального распределения продольной и азимутальной компонент магнитного ВЧ-поля показало, что при магнитных полях более 10 Гс в ИП формируется частично стоячая волна. Положение локальных максимумов азимутальной и продольной компонент ВЧ-поля сдвинуты друг относительно друга по продольной координате. Число полуволн, укладываемых на длине источника плазмы, зависит от величины индукции внешнего магнитного поля и длины ИП. 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 ИП.

Ключевые слова: индуктивный, высокочастотный, разряд, плазма, волны, индукция внешнего магнитного поля.

Ссылка: Никонов А. М., Неклюдова П. А., Кралькина Е. А., Вавилин К. В., Задириев И. И. // Успехи прикладной физики. 2018. Т. 6. № 5. С. 390.

Reference: A. M. Nikonov, P. A. Nekliudova, E. A. Kralkina, K. V. Vavilin, and I. I. Zadiriev, Usp. Prikl. Fiz. **6** (5), 390 (2018).

Введение

Технологии, основанные на применении газовых разрядов, являются неотъемлемой частью современной индустрии. Так, в наземных технологиях газовый разряд используется для модификации

и травления поверхности материалов, напыления и осаждения функциональных покрытий [1], в космических технологиях газоразрядная плазма применяется в качестве рабочего тела электроракетных двигателей, поток ионов на выходе из которых создаёт реактивную тягу [2].

Частным случаем газового разряда является индуктивный высокочастотный (ВЧ) разряд, который находит своё применение практически во всех указанных областях [3]. Особый интерес представляет индуктивный ВЧ-разряд во внешнем магнитном поле, позволяющий получать плазму высокой плотности [4]. В научной литературе индуктивный высокочастотный разряд во внешнем магнитном поле принято называть геликонным [4].

Основными требованиями, предъявляемыми промышленностью к параметрам технологических

Никонов Александр Михайлович, аспирант.
Неклюдова Полина Алексеевна, м.н.с., к.ф.-м.н.
Кралькина Елена Александровна, в.н.с., д.ф.-м.н.
Вавилин Константин Викторович, вед. инженер, к.ф.-м.н.
Задириев Илья Игоревич, инженер, к.ф.-м.н.
МГУ им. Ломоносова. Физический факультет.
Россия, 111991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2.
E-mail: nikonov.207@mail.ru, nekliudova_pa@mail.ru,
ekralkina@mail.ru, viline@inbox.ru, s_333_52@mail.ru

Статья поступила в редакцию 15 июня 2018 г.

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

источников плазмы (ИП), являются большая энергетическая эффективность устройств, высокая плотность электронов, а также однородность плазмы вблизи подложки. В работах [5–8] в качестве технологического плазменного реактора предложено использовать источник сложной формы, состоящий из системы газоразрядных камер, в которых возбуждается геликонный разряд, и технологической камеры, где расположена подложка и куда распространяется плазма, образованная в газоразрядных камерах. Заметим, что создание сильных магнитных полей (500–1000 Гс) в большом объеме, характерном для технологической камеры, является довольно сложной задачей. Поэтому в работах [5–8], были исследованы свойства разряда в области относительно низких (до 100 Гс) магнитных полей. Было обнаружено, что в ряде случаев эффективность вложения ВЧ-мощности (эквивалентное сопротивление плазмы) имеет локальный максимум при магнитных полях порядка 30 Гс. Природа локального максимума в [5–8] была связана с возбуждением волны Трайвелписа–Голда (т. н. косой ленгмюровской волны).

Известно, что в индуктивном ВЧ-разряде ВЧ-поля скинируются и не проникают в основной объем плазмы. Наложение внешнего магнитного поля, индукция которого соответствует областям резонансного поглощения ВЧ-мощности, сопровождается появлением областей прозрачности, где ВЧ-поля проникают вглубь плазмы и эффективно нагревают электроны [9]. К таким областям можно отнести магнитные поля, индукция которых соответствует условиям электронного циклотронного резонанса (ЭЦР), и областям резонансного возбуждения геликонов и косых ленгмюровских волн [9].

В работе [10] выполнен теоретический анализ поведения эквивалентного сопротивления плазмы в области ЭЦР, то есть при условиях, когда

$$|\omega - \Omega_c| \ll kV_{Te} \approx \left(\sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{\omega_{Le}^2 \omega}{c^2 V_{Te}} \right)^{1/3} V_{Te} \ll \Omega_c,$$

где ω – частота генератора, $\Omega_c = eB / m_e c$ – частота ЭЦР, $V_{Te} = \sqrt{T_e / m_e}$ – тепловая скорость движения электронов, $k = \pi / L$, $\omega_{Le} = \sqrt{4\pi e^2 n_e / m_e}$ – ленгмюровская частота электронов, B – индукция магнитного поля, e – заряд электрона, c – скорость света, m_e – масса электрона. Показано, что с ростом концентрации электронов положение максимума эквивалентного сопротивления смещается в область больших магнитных полей по сравнению с полем, для которого выполняется равенство $\omega = \Omega_c$. Так, при концентрациях плазмы порядка

$(1-3) \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$ максимум эквивалентного сопротивления при рабочей частоте 13,56 МГц смещается в область магнитных полей 7–9 Гс. Дальнейший рост концентрации электронов приводит к смещению максимума эквивалентного сопротивления в область магнитных полей, где справедливо неравенство $\omega_{Li} \ll \omega \ll \Omega_c \ll \omega_{Le}$ (ω_{Li} – ленгмюровская частота ионов). Решение электродинамической задачи [11], показало, что возбуждаемые в плазме поля являются суперпозицией двух решений. При магнитных полях более 20–30 Гс и чисто индуктивном возбуждении разряда они могут быть сопоставлены с геликонной и косой ленгмюровской волнами, т. к. у первого решения азимутальная составляющая электрического ВЧ-поля существенно превышает продольную, а у второго решения, наоборот, продольная составляющая существенно превышает азимутальную. В реальном ВЧ-разряде наряду с индуктивной составляющей всегда присутствует паразитная емкостная составляющая. Заряд, возникающий на поверхности источника плазмы, также может привести к возбуждению волн в плазме [11]. При этом деление возбуждаемых волн на геликонную и косую ленгмюровскую волну становится некорректным. Численные расчеты, выполненные в [11], показали, что в области $\omega_{Li} \ll \omega \ll \Omega_c \ll \omega_{Le}$ при относительно невысоких плотностях плазмы (менее 10^{12} см^{-3}) наблюдается локальный максимум эквивалентного сопротивления при относительно невысоких магнитных полях, а именно, 20–50 Гс. Рост концентрации электронов сопровождается смещением максимума эквивалентного сопротивления в область более сильных магнитных полей. Помимо концентрации электронов, положение максимума эквивалентного сопротивления зависит от частоты столкновений электронов с тяжелыми частицами и от геометрических размеров источника плазмы.

В работах [12–23] выполнены подробные исследования свойств индуктивного ВЧ-разряда, помещенного во внешнее магнитное поле. В частности, изучены параметры плазмы и структуры волн, влияния емкостной составляющей разряда на характеристики плазмы в двухкамерном индуктивном источнике плазмы, состоящем из одной газоразрядной и технологической камер [14]. Показано, что с ростом магнитного поля происходит «перекачка» плотности плазмы из газоразрядной камеры в технологическую при наличии в области газоразрядной камеры расходящегося магнитного поля и однородного магнитного поля в области технологической камеры. При некотором пороговом значении магнитного поля, величина которого зависит от частоты, в источнике плазмы наблюдаются частично стоячие волны. Число полуволн,

укладывающихся на длине плазменного столба, зависит от величины магнитного поля и рабочей частоты.

Использование одной газоразрядной камеры в составе двухкамерного источника не позволяет получить в технологической камере протяженных областей однородной плазмы. Усложнение конструкции плазменного реактора за счет использования набора газоразрядных камер ставит задачу согласования режимов их работы с целью обеспечения однородности плазмы в технологической камере.

Целью данной работы являлось исследование однокамерного источника плазмы относительно большого диаметра – 20 см. В качестве решаемых задач изучены эффективность поглощения ВЧ-мощности плазмой и ее связь со структурой возбуждаемых волн при трех длинах источника – 20, 32 и 52 см. Отдельно рассмотрено влияние на указанные выше характеристики канала постоянного тока, возникающего в источнике плазмы при подаче на подложку отрицательного потенциала относительно земли.

Экспериментальная установка и методики измерений

Все измерения выполнены в аргоне в диапазоне давлений 0,1–2,3 мТорр при значениях магнитного поля 10–65 Гс и мощностях ВЧ-генератора в диапазоне 0–1000 Вт. В настоящем эксперименте была использована соленоидальная антенна, которая должна приводить к возбуждению азимутально симметричных волн [24].

Схема источника плазмы представлена на рис. 1. Источник состоит из кварцевого цилиндра диаметром 20 см и высотой 42 см. Он установлен на металлической вакуумной камере диаметром 60 см 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 исследовались разряды длиной 52, 32 и 20 см.

Ввод ВЧ-мощности осуществляется с помощью охлаждаемой трехвитковой спиральной антенны, намотанной 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.

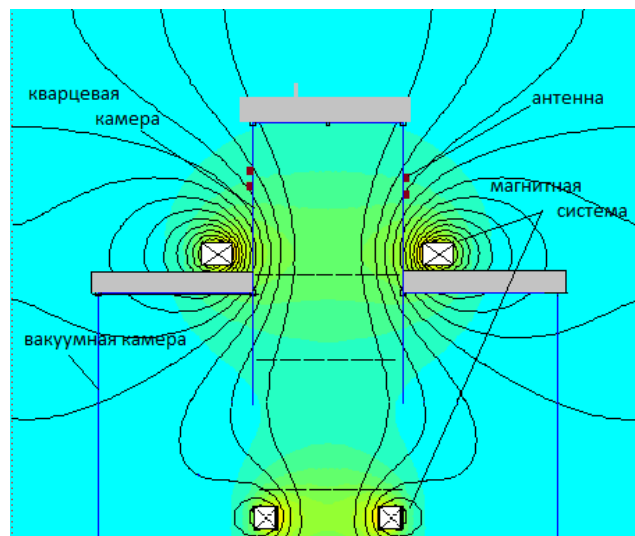


Рис. 1. Схема источника плазмы и распределение магнитных силовых линий.

Внешнее магнитное поле создается при помощи электромагнитов, т. е. токовых катушек, расположенных вокруг источника плазмы. Один из магнитов лежит на верхнем фланце металлической камеры, второй электромагнит расположен на дне металлической вакуумной камеры. Выбранная конфигурация магнитов обеспечивает конфигурацию магнитного поля, показанную на рис. 1. Исследованный диапазон изменения индукции внешнего магнитного поля в области антенны B 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.

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

В работе проводились следующие измерения:

- 1) доли мощности ВЧ-генератора, поступающей в плазму;
- 2) азимутальной B_ϕ и продольной B_z составляющих высокочастотного магнитного поля.

Отметим, что появление в разряде азимутальной составляющей B_ϕ является индикатором возбуждения в разряде волны Е-типа, в то время как

появление продольной составляющей B_z служит индикатором возбуждения в разряде волны В-типа [25].

Для анализа закономерностей энергоклада в разряд в данной работе использовалось понятие эквивалентного сопротивления плазмы. Эквивалентное сопротивление, имеющее размерность сопротивления, характеризует меру способности плазмы поглощать ВЧ-мощность. Методика его измерения подробно описана в работах [11–13].

В случае индуктивного ВЧ-разряда низкого давления, как правило, не вся мощность ВЧ-генератора поглощается плазмой. Другими словами, мощность P_{gen} , поступающая от ВЧ-генератора, делится между двумя нагрузками, а именно, антенной, обладающей активным сопротивлением R_{ant} , и плазмой, характеризуемой эквивалентным сопротивлением R_{pl} . При этом выражение для баланса мощности во внешней цепи генератора принимает вид:

$$P_{gen} = \frac{1}{2} I_{ant}^2 (R_{ant} + R_{pl}). \quad (1)$$

Пользуясь формулой (1), легко получить выражение, позволяющее определить эквивалентное сопротивление плазмы индуктивного разряда R_{pl} [11–13]:

$$R_{pl} = \frac{2P_{gen}}{I_{ant}^2} - R_{ant} \quad (2)$$

Сопротивление антенны R_{ant} можно найти по формуле:

$$R_{ant} = \frac{2P_{gen}^0}{I_{ant0}^2}, \quad (3)$$

измерив мощность ВЧ-генератора P_{gen}^0 и ток антенны I_{ant0} без разряда. Формула (3) верна в предположении, что в отсутствие разряда вся мощность ВЧ-генератора расходуется во внешней цепи.

Мощность, вложенная в плазму, P_{pl} определяется выражением:

$$P_{pl} = \frac{1}{2} I_{ant}^2 R_{pl}. \quad (4)$$

Подводимая к разряду мощность от ВЧ-генератора в работе определялась как разность между падающей и отраженной мощностями. Ток, текущий через антенну I_{ant} , определялся с помощью пояса Роговского [26].

Измерения азимутальной B_ϕ и продольной B_z составляющих высокочастотного магнитного поля осуществлялись с помощью магнитных зондов, помещенных внутрь плазмы. Магнитный зонд представлял собой небольшую катушку, состоящую из 10–15 витков диаметром 2 мм и помещенную в стеклянный кожух, примыкающий 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 была 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 компенсируют друг друга, и на вторичную обмотку трансформатора попадает только полезный сигнал. В качестве сердечника трансформаторной развязки использовалось ферритовое кольцо, на две стороны которого намотаны провода, подсоединённые к зонду и к измерительной электрической цепи соответственно. После развязки сигнал по ВЧ изолированному кабелю поступает на осциллограф. Сама развязка помещена в заземлённый стальной корпус для исключения ВЧ-наводок внутри цепи.

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_ϕ , 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 пояса Роговского.

Погрешности измеряемых величин составляли 10–15 %.

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

Результаты измерений

Вложение мощности

На рис. 2 показаны зависимости эффективности вложения ВЧ-мощности P_{pl}/P_{gen} от индукции внешнего магнитного поля B , измеренные при различных мощностях ВЧ-генератора P_{gen} и давлениях аргона в источниках плазмы длиной 20 и 52 см.

Как видно, в источнике плазмы длиной 20 см значения P_{pl}/P_{gen} немонотонно зависят от B . При малых значениях B от 12 до 28 Гс в районе верхнего магнита, также как и в работах [5–8], наблю-

дается локальный максимум отношения P_{pl}/P_{gen} . При давлении 0,1 мТорр с ростом мощности ВЧ-генератора локальный максимум P_{pl}/P_{gen} уширяется и смещается в область больших магнитных полей. Эффективность вложения ВЧ-мощности в плазму повышается при увеличении P_{gen} . Так, при $P_{gen} = 800$ Вт до 85 % мощности ВЧ-генератора поглощается плазмой. Увеличение давления при $P_{gen} = 200$ Вт приводит к уширению локального максимума P_{pl}/P_{gen} , а при $P_{gen} = 800$ Вт P_{pl}/P_{gen} монотонно возрастает в рассмотренном диапазоне магнитных полей.

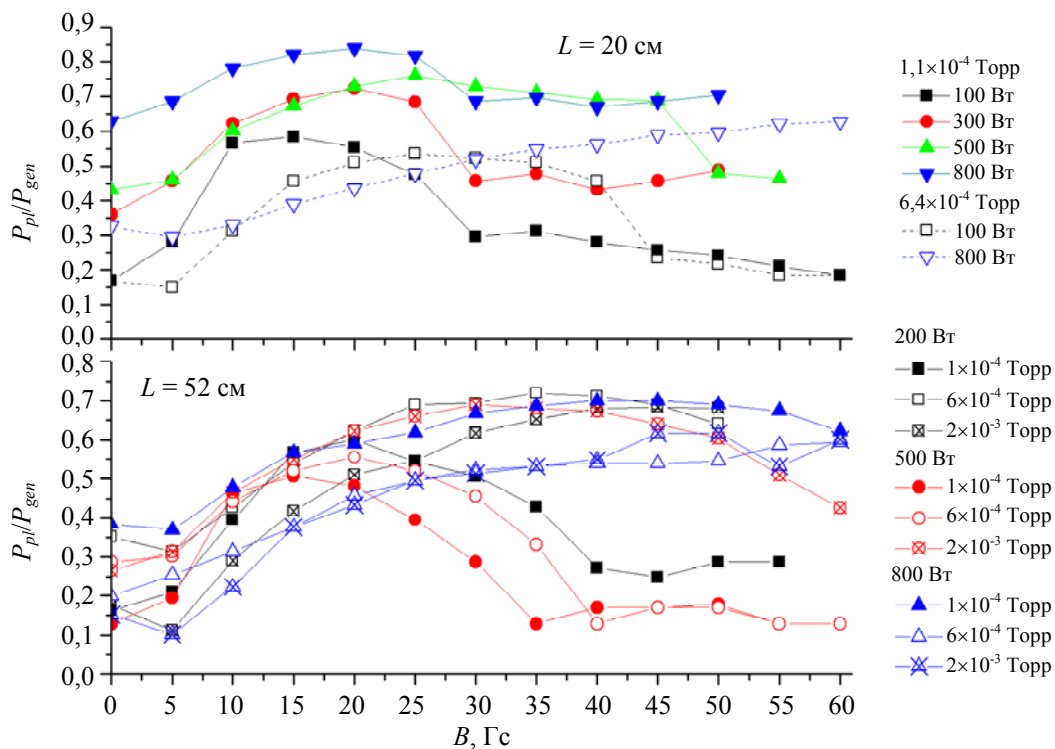


Рис. 2. Зависимость доли ВЧ-мощности, поглощенной плазмой, от величины внешнего магнитного поля при различных мощностях ВЧ-генератора и давлениях аргона. Измерения с источником плазмы длиной 20 и 52 см.

В источнике плазмы длиной 52 см при относительно низкой мощности ВЧ-генератора (200 Вт) наблюдается явный максимум при значении внешнего магнитного поля порядка 20 Гс. Увеличение мощности ВЧ-генератора приводит также, как и в случае источника длиной 20 см, к уширению максимума и смещению максимума P_{pl}/P_{gen} в область больших B . При мощности ВЧ-генератора 800 Вт положение максимума смещается в область величин магнитных полей, превышающих максимальные значения B , рассмотренные в настоящей работе. Обращает на себя внимание, что эффективность вложения мощности

при мощности ВЧ-генератора 800 Вт и значениях магнитного поля менее 20 Гс оказывается ниже, чем при мощностях ВЧ-генератора 200 Вт.

Необходимо отметить, что рост давления сопровождается увеличением эффективности вложения ВЧ-мощности при отсутствии магнитного поля. Это свидетельствует о возрастании вклада столкновительного механизма в поглощение ВЧ-мощности с ростом концентрации атомов.

Сопоставление результатов, полученных в источниках плазмы 22 и 52 см при одной и той же мощности ВЧ-генератора 800 Вт, показывает, что значения P_{pl}/P_{gen} , измеренные в источниках

плазмы различной длины, существенно различаются. В «коротком» источнике плазмы эффективность вложения ВЧ-мощности при малых значениях индукции внешнего магнитного поля существенно выше.

Полученные результаты находятся в согласии с результатами численного расчета эквивалентного сопротивления плазмы (см. рис. 3), выполненного на основании самосогласованной модели [11] индуктивного ВЧ-разряда с внешним магнитным полем, учитывающей возбуждение как геликонной, так и кривой ленгмюровской волн. Недостатком модели является предположение о постоянстве плотности плазмы в объеме источника. Наличие локальных максимумов зависимости эквивалентного сопротивления плазмы от величины магнитного поля связано с резонансным возбуждением радиальных мод кривой ленгмюровской волны. Теоретическая модель [27, 28] предполагает, что на длине источника плазмы укладывается половина длины волны, возбуждаемой азимутальным током, текущим по поверхности источника плазмы.

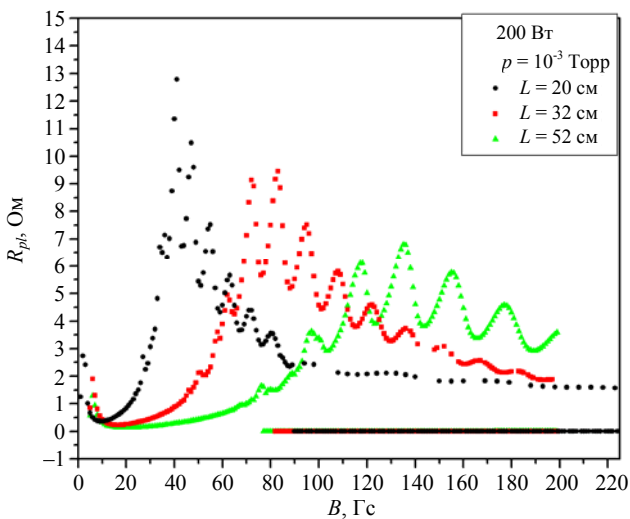


Рис. 3. Численный расчёт зависимости эквивалентного сопротивления плазмы от индукции внешнего магнитного поля для источников плазмы длиной 20, 32, 52 см.

Дополнительно к описанным выше экспериментам было выполнено исследование влияния канала постоянного тока на эффективность вложения ВЧ-мощности в плазму. Рассмотрим вольт-амперную характеристику (ВАХ) канала постоянного тока. Измеренные величины показаны на рис. 4. Как видно, при отрицательном смещении электрода-катода $V_{DC} = 10-50$ В во всех рассмотренных случаях происходит формирование приэлектродного слоя. При $V_{DC} > 10-50$ В возникает аномальный режим горения тлеющего разряда. При фиксированных значениях B незначительный рост разрядного тока возможен только при существен-

ном увеличении напряжения, приложенного между электродами, ограничивающими разряд. Значительное увеличение разрядного тока возможно только за счет увеличения мощности ВЧ-генератора и выбора индукции внешнего магнитного поля, соответствующего максимуму эффективности поглощения ВЧ-мощности.

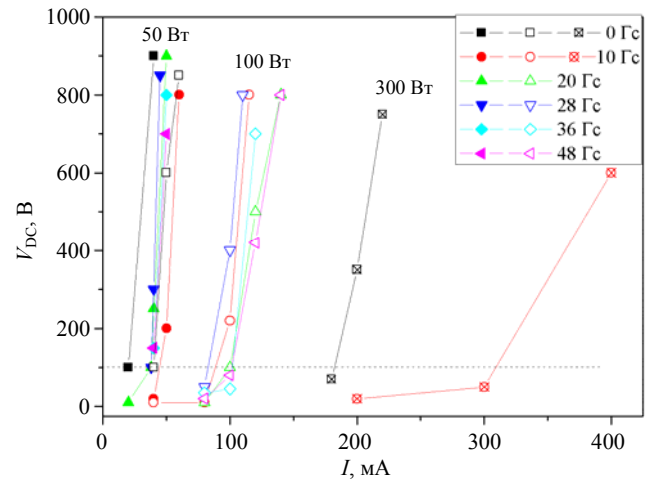


Рис. 4. ВАХ канала постоянного тока.

На основании данных, представленных на рис. 4, были вычислены величины мощности, поступающей 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 т. ч. предназначенных для травления [4, 29–31]. Оценки показывают, что P_{DC} изменяется пропорционально мощности, поступающей в разряд через индуктивный канал P_{pl} . Однако абсолютные значения P_{DC} не превышают 10 % от мощности, поступающей в разряд через индуктивный канал, и не оказывают заметного влияния на P_{pl} .

Сопоставление полученных закономерностей с результатами экспериментальных и теоретических работ [10–24, 27, 28] позволяет предположить, что в источнике плазмы происходит возбуждение волн. В связи с этим на следующем этапе работы были выполнены измерения магнитных ВЧ-полей. Отметим, что при условиях экспериментов выполняется неравенство $\omega_{Li} \ll \omega \ll \ll \Omega_e \ll \omega_{Le}$.

Структура волн

Рассмотрим структуру волн, возбуждаемых в источнике плазмы длиной 32 см, при изменении индукции внешнего магнитного поля. В работе [32] была исследована структура волн, возбужда-

емых в ИП в зависимости от мощности ВЧ-генератора при фиксированном магнитном поле. Было показано, что наиболее «богатая» структура формируется при мощности ВЧ-генератора 800 Вт. Результаты, представленные ниже, были выполнены при указанной мощности генератора.

Аксиальное распределение амплитуды ВЧ-поля B_z и фазы волны при различных значениях индукции магнитного поля показаны на рис. 5. С увеличением индукции внешнего магнитного поля в диапазоне 20 и 36 Гс число локальных максимумов B_z , наблюдаемых на оси источника плазмы, возрастает. При достижении индукции внешнего магнитного поля 36 Гс, близкого к максимуму эффективности поглощения ВЧ-мощности, число локальных максимумов достигает трёх. Дальнейшее увеличение магнитного поля сопровождается уменьшением числа локальных максимумов.

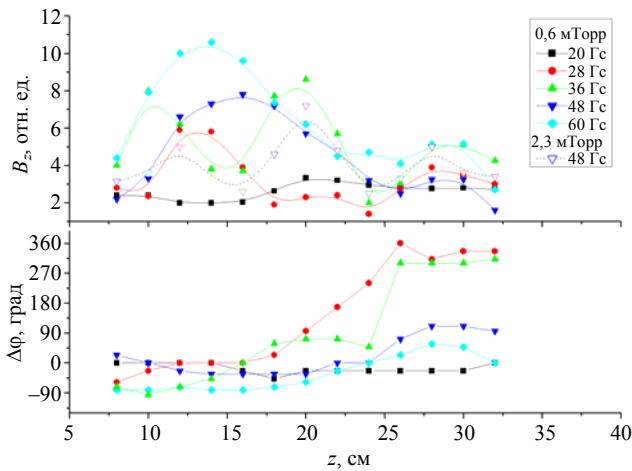


Рис. 5. Аксиальная зависимость амплитуды и фазы продольной компоненты магнитного ВЧ-поля.

Результаты измерения разности фаз между сигналом с магнитного зонда и опорным сигналом (током антенны) представлены в нижней части рис. 5. Изменение фазы волны показывает, что в источнике плазмы возникает частично стоячая волна. При магнитном поле 36 Гс возбуждаемая волна наиболее близка к стоячей, а длина волны — к 16 см. При значении $B = 28$ Гс фазовая скорость волны составляет величину порядка $5,4 \times 10^8$ см/с, значения фазовой скорости при $B = 36$ Гс и 48 Гс ниже и составляют $4,9 \times 10^8$ см/с и $3,25 \times 10^8$ см/с соответственно. Близкие значения были получены в работе [21] при использовании антенны типа антенны Босвелла. Однако, как видно из рис. 5, в настоящем эксперименте, в отличие от работ [20, 21], число полуволн, укладывающихся на рассмотренной длине источника плазмы, зависит от величины индукции внешнего магнитного поля, при этом длина волны не кратна длине антенны. Аналогичный результат был получен в работах

[14, 33]. Увеличение давления сопровождается смещением положения максимума эффективности поглощения в область больших магнитных полей. Соответственно структура с тремя локальными максимумами возникает при магнитном поле 48 Гс. Это видно из рис. 5, где пунктирной линией изображён профиль распределения B_z для большего давления $2,3 \times 10^{-3}$ Торр.

На рис. 6 показано радиальное распределение поля B_z , измеренное на расстоянии 16 см от верхнего фланца источника плазмы. При индукции магнитного поля более 20 Гс амплитуда продольной компоненты магнитного ВЧ-поля достигает максимума на оси ИП. Чем больше внешнее магнитное поле, тем в меньшей области вблизи оси локализуется B_z . По мере приближения к нижнему фланцу зависимость B_z от радиуса становится более сложной, при этом максимум амплитуды ВЧ-поля смещается к середине радиуса. Вблизи антенны поле не проникает в плазму во всех исследованных случаях.

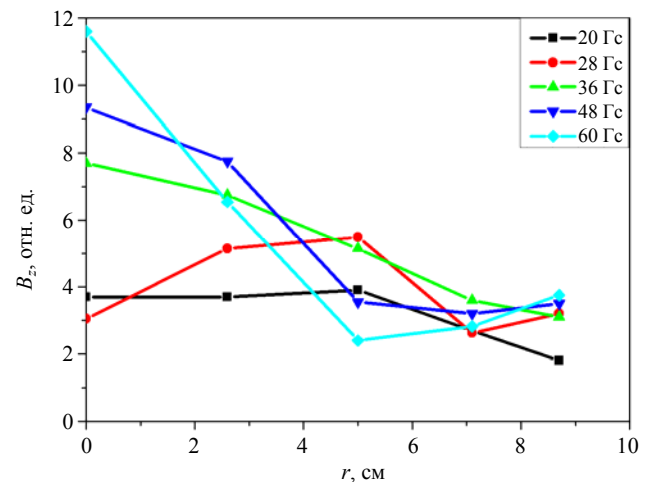


Рис. 6. Радиальная зависимость амплитуды продольной компоненты магнитного ВЧ-поля при $z = 16$ см.

Измерения показали, что магнитное ВЧ-поле в источнике плазмы имеет как продольную, так и азимутальную компоненту. Для амплитуды азимутальной компоненты магнитного ВЧ-поля также характерно немонотонное изменение с увеличением координаты z . Положение локальных максимумов азимутальной и продольной компонент ВЧ-поля сдвинуты друг относительно друга по координате z , причем величина сдвига зависит от индукции внешнего магнитного поля. При условии, когда возбуждаемая волна наиболее близка к стоячей, значения z , при которых амплитуда B_z максимальна, соответствуют условиям, когда амплитуда B_ϕ минимальна, и наоборот. Это отчетливо видно из рис. 7. Здесь показано аксиальное распределение B_z , измеренное в ИП с разными длинами при одном и том же магнитном поле 36 Гс.

Как видно, в пределах погрешности эксперимента расстояние между локальными максимумами и локальными минимумами волновой структуры

совпадает и близко к 8 см. Таким образом, во всех трех рассмотренных ИП длина возбуждаемой волны близка к 16 см.

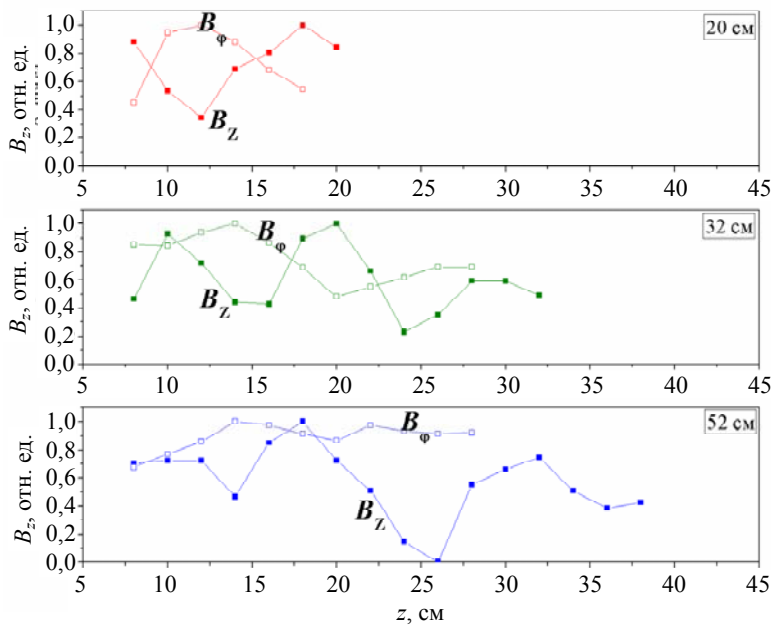


Рис. 7. Зависимость амплитуды B_ϕ и B_z от высоты источника плазмы для случаев 20, 32 и 52 см.

В заключение в работе было изучено влияние отрицательного смещения, подаваемого на нижний электрод, на структуру волн, возбуждаемых в ИП. Полученные результаты представлены на рис. 8. Как видно, наличие отрицательного смещения на нижнем электроде приводит к существенному увеличению амплитуды ВЧ магнитных полей, но не сопровождается изменением структуры возбуждаемой 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.

В этом случае уравнение для амплитуды результирующей волны A_z принимает вид [14]:

$$A = A \left(e^{-\Delta k z} e^{-i k z} + r e^{-\Delta k (2L - z)} e^{-i k (L - z)} \right) \quad (5)$$

где $k = \pi n / L$ – волновой вектор, n – число длин полувольт, уместающихся на длине источника L , Δk – коэффициент затухания, r – коэффициент отражения.

На рис. 9 показана зависимость амплитуды A_z от продольной координаты при различных значениях коэффициента отражения и поглощения волны. Можно видеть, что амплитуда волны растет при увеличении r и уменьшении Δk . 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 на границе ИП. Последнее, в свою очередь, может быть следствием формирования приэлектродного слоя и наличия градиента концентрации электронов вблизи слоя.

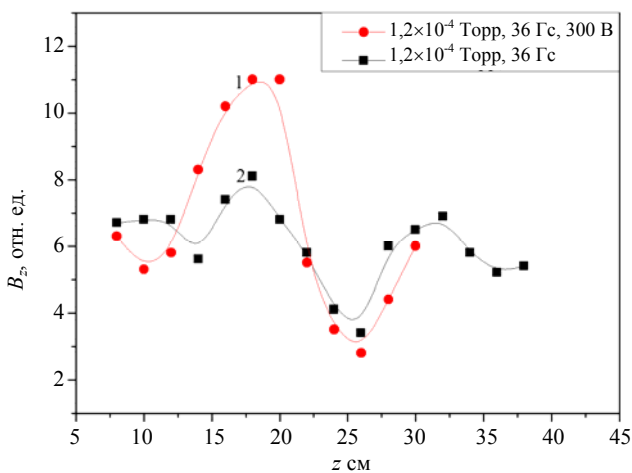


Рис. 8. Продольное распределение амплитуды B_z при наличии (1) и отсутствии (2) постоянного смещения, внешнее магнитное поле 36 Гс.

Обсуждение результатов

Для описания экспериментальных данных естественно предположить, что профиль волны,

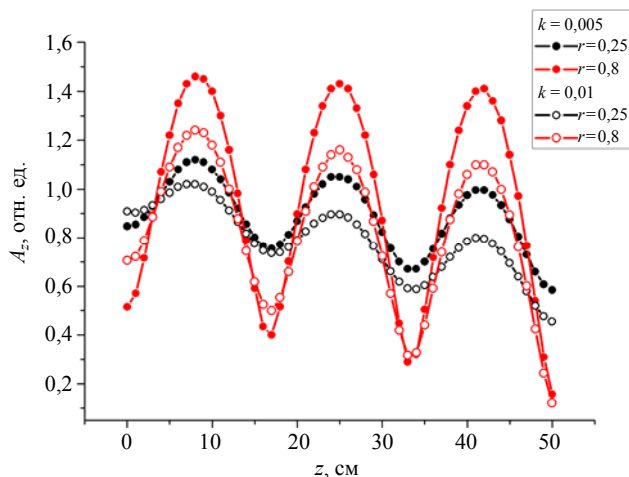


Рис. 9. Зависимость амплитуды A_z от продольной координаты при различных значениях коэффициента отражения r и поглощения волны Δk .

Заключение

Результаты исследований, выполненные в настоящей работе, показали, что в диапазоне магнитных полей 10–60 Гс эффективность вложения ВЧ-мощности немонотонно зависит от магнитного поля при давлении аргона менее 1 мТорр и мощностях ВЧ-генератора менее 800 Вт во всех трех рассмотренных ИП. Увеличение давления, мощности ВЧ-генератора и длины ИП сопровождаются сдвигом положения локального максимума в область величин магнитных полей, превышающих максимальные B_z , рассмотренные в настоящей работе. При подаче на нижний электрод напряжения -100 В эффективность вложения ВЧ-мощности возрастает не более чем на 5 %.

При значениях внешнего магнитного поля более 10 Гс в ИП наблюдаются как продольная, так и азимутальная компоненты магнитного ВЧ-поля. В ИП трех рассмотренных длин 20, 32 и 52 см формируется частично стоячая волна. При давлении 0,6 мТорр в ИП длиной 32 см с увеличением индукции внешнего магнитного поля в диапазоне 20 и 36 Гс число локальных максимумов B_z , наблюдаемых на оси источника плазмы, возрастает. При достижении индукции внешнего магнитного поля 36 Гс, соответствующего максимуму эффективности поглощения ВЧ-мощности, число локальных максимумов достигает трёх. Дальнейшее увеличение магнитного поля сопровождается уменьшением числа локальных максимумов. При большем давлении аргона (2,3 мТорр) структура, состоящая из трех локальных максимумов, наблюдается при магнитном поле 48 Гс. При подаче на нижний электрод напряжения -100 В амплитуда продольной и азимутальной компонент магнитно-

го ВЧ-поля возрастает, что связано с увеличением коэффициента отражения волны на границе ИП.

Для амплитуды азимутальной компоненты магнитного ВЧ-поля также характерно немонотонное изменение с увеличением координаты z . Положение локальных максимумов азимутальной и продольной компонент ВЧ-поля сдвинуты друг относительно друга по координате z , причем величина сдвига зависит от индукции внешнего магнитного поля. При условии, когда возбуждаемая волна наиболее близка к стоячей, значения z , при которых амплитуда B_z максимальна, соответствуют условиям, когда амплитуда B_ϕ минимальна, и наоборот.

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

- Rosnagel S. M., Cuomo J. J., Westwood W. D. Handbook of plasma processing technology, 1st edition, fundamental etching, deposition and surface interactions — 1990.
- Mazouffre S. // Plasma Sources Sci. Technol. 2016. Vol. 25. P. 033002.
- Lee Hyo-Chang // Applied Physics Reviews. 2018. Vol. 5. P. 011108; doi: 10.1063/1.5012001.
- Chen F. F. High Density Plasma Sources. Ed. by Oleg A. Popov – Park Ridge, New Jersey: Noyes Publications, 1996.
- Chen F. F., Jiang X., Evans J. D., Tynan G., Arnush D. // Plasma Phys. Control. Fusion. 1977. Vol. 39. P. A411.
- Chen F. F., Arnush D., Evans J. D., Blackwell D. D. / ECA of 1998 ICPP&25th Conf. on Contr. Fusion and Plasma Physics (Praha. 1998), Vol. 22C. P. 2655-2638.
- Arnush D. // Physics of Plasmas. 2000. Vol. 7. No. 7. P. 3042.
- Blackwell D. D., Madziwa T. G., Arnush D., Chen F. F. // Physical review letters. 2002. Vol. 88. P. 0031-9007.
- Гинзбург В. Л., Рухадзе А. А. Волны в магнитоактивной плазме. – М.: Наука, 1970.
- Вавилин К. В., Плаксин В. Ю., Пу М. Х., Рухадзе А. А. // Журнал технической физики. 2004. Т. 74. № 6. С. 25.
- 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; https://doi.org/10.1063/1.5023631.
- Александров А. Ф., Бугров Г. Э., Вавилин К. В., Керимова И. Ф., Кралькина Е. А., Павлов В. Б., Плаксин В. Ю., Рухадзе А. А. // Прикладная физика. 2006. № 4. С. 54.
- Александров А. Ф., Бугров Г. Э., Вавилин К. В., Керимова И. Ф., Кралькина Е. А., Павлов В. Б., Плаксин В. Ю., Рухадзе А. А. // Прикладная физика. 2006. № 2. С. 41.
- Петров А. К. Дисс. ... канд. физ.-мат. наук. – М.: МГУ, 2016.

15. Aliev Yu. M., Krämer M. // *Physics of Plasmas*. 2016. Vol. 23. P. 103505.
16. Tysk Sh. M., Denning C. M., Scharer J. E., Akhtar K. // *Physics of plasmas*. 2003. Vol. 11. P. 878.
17. Boswell R. W. // *Phys. Lett. A*. 1970. Vol. 33. P. 457.
18. Boswell R. W. // *Plasma Phys. Controlled Fusion*. 1984. No. 26. P. 1147.
19. Degening A. W., Jung C. O., Boswell R. W., Ellingboe A. R. / 1996 Space Plasma & Plasma Processing Group, Plasma Research School of Physical Sciences and Engineering, (Australian National University, Canberra, Australia, 1996).
20. Chang L., Hole M. J., Caneses J. F., Chen G., Blackwell B. D., Corr C. S. // *Physics of Plasmas*. 2012. Vol. 19. P. 083511.
21. Niu Ch., Zhao G., Wang Yu, Zhongwei Liu Zh., Chen Q. // *Physics of Plasmas*. 2017. Vol. 24. P. 013518.
22. Lee Ch. A., Chen G., Arefiev A.V., Bengtson R. D., Breizman B. N. // *Physics of Plasmas*. 2011. Vol. 18. P. 013501.
23. Franck C. M., Grulke O., Stark A., Klinger T., Scime E. E., Bonhomme G. // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2005. Vol. 14. P. 226.
24. Shamrai K. P., Pavlenko V. P., Taranov V. B. // *Plasma Physics and Controlled Fusion*. 1997. Vol. 39. No. 3. P. 505.
25. Кузелев М. В. Волновые явления в средах с дисперсией. – ЛЕНАНД, 2017.
26. Хаддлстоун Р., Леонард С. Диагностика плазмы. – М.: Мир, 1967.
27. Aleksandrov A. F., Bugrov G. E., Vavilin K. V., Kerimova I. F., Kondranin S. G., Kral'kina E. A., Pavlov V. B., Plaksin V. Y., Rukhadze A. A. // *Plasma Physics Reports*. 2004. Vol. 30. No. 5. P. 398.
28. Kralkina E. A. // *Physics- Uspechi*. 2008. Vol. 51. No. 5. P. 493.
29. Lieberman M. A., Lichtenberg A. J. Principles of plasma discharges and materials processing – Hoboken New Jersey. John Wiley & Sonc, Inc., 2005.
30. Chamber P., Braitwaite N. *Physics of Radio-Frequency Plasmas* – N.Y., 2011
31. Donnelly V. M., Kornblit A. // *J. Vac. Sci. Technol.* 2013 V.A. Vol. 31 No. 5. P. 050825.
32. Кралькина Е. А., Никонов А. М. // *Прикладная физика*. 2007. № 6. С. 20.
33. Семенюк В. Ф., Веремейченко Г. Н., Вирко В. Ф., Слободян В. М. / Материалы IX международной научно-технической конференции «Вакуумная техника, материалы и технология» (Москва, 2014).

PACS: 52.80.-s, 52.80.Pi

Power absorption and the wave structure in an inductive radio-frequency plasma source located in a weak external magnetic field

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

Moscow State University, Department of Physics
 Bld. 2, 1 Leninskie gory, Moscow, 111991, Russia
 E-mail: nikonov.207@mail.ru, nekludova_pa@mail.ru,
 ekralkina@mail.ru, viline@inbox.ru, s_333_52@mail.ru

Received June 15, 2018

The efficiency of radio-frequency (RF) power absorption in plasma and the structure of excited waves in inductive RF plasma sources with a diameter 20 cm and lengths 20, 32 and 52 cm in the presence of an external magnetic field of 10–65 Gs was investigated. The measurements were carried out in argon in the pressure range 0.1–2.3 mTorr and the power of the RF generator 0–1000 W. For the inductive discharge, a solenoidal antenna was used. In parallel with the inductive channel in the discharge, a direct current (DC) channel was formed by two electrodes located at the ends of a cylindrical plasma source. It is shown that at an argon pressure less than 1 mTorr and at the RF generator power values less than 800 W for three considered plasma sources, the efficiency of the RF power non-monotonically depends on the magnetic field. The measurement of the axial distribution of the longitudinal and azimuthal components of the RF magnetic field showed that a partially standing wave forms in the plasma source for magnetic fields higher than 10 Gs. The positions of the local maxima of the azimuthal and longitudinal components of the RF field shift relative to each other along the longitudinal coordinate. The number of half-waves that correspond to the length of the plasma source depends on the magnitude of the external magnetic field and the length of the plasma source. When the voltage is applied between the electrodes, the amplitudes of the longitudinal and azimuthal components of the radio-frequency magnetic field increase. It is associated with an increase in the reflection coefficient of the wave at the boundary of the plasma source.

Keywords: Inductive, radio-frequency, discharge, plasma, waves, external magnetic field.

REFERENCES

1. S. M. Rossnagel, J. J. Cuomo, and W. D. Westwood, *Handbook of plasma processing technology 1st edition fundamental etching, deposition and surface interactions* (1990).
2. S. Mazouffre, *Plasma Sources Sci. Technol.* **25**, 033002 (2016).
3. Lee Hyo-Chang, *Applied Physics Reviews* **5**, 011108 (2018); doi: 10.1063/1.5012001.
4. F. F. Chen, *High Density Plasma Sources*. Ed. by Oleg A. Popov (Park Ridge, New Jersey: Noyes Publications, 1996).
5. F. F. Chen, X. Jiang, J. D. Evans, G. Tynan, and D. Arnush, *Plasma Phys. Control. Fusion* **39**, A411 (1977).
6. F. F. Chen, D. Arnush, J. D. Evans, and D. D. Blackwell, in *ECA of 1998 ICPP&25th Conf. on Contr. Fusion and Plasma Physics* (Praha, 1998), **22C**, pp. 2655–2638.
7. D. Arnush, *Physics of Plasmas* **7** (7), 3042 (2000).
8. D. D. Blackwell, T. G. Madziwa, D. Arnush and F. F. Chen, *Physical Review Letters* **88**, 0031-9007 (2002).
9. V. L. Ginsburg, A. A. Rukhadze, *Waves in Magnetoactive Plasma* (Nauka, Moscow, 1970) [in Russian].
10. K. V. Vavilin, V. Yu. Plaksin, M. Kh. Ri, and A. A. Rukhadze, *Technical Physics*, **49** (6), 686 (2004).
11. E. A. Kralkina, A. A. Rukhadze, P. A. Nekliudova, V. B. Pavlov, A. K. Petrov, and K. V. Vavilin. *AIP Advances* **8**, 035217 (2018); <https://doi.org/10.1063/1.5023631>.
12. A. F. Alexandrov, G. E. Bugrov, K. V. Vavilin, I. Y. Kerimova, E. A. Kralkina, V. B. Pavlov, V. Yu. Plaksin, and A. A. Rukhadze, *Prikl. Fiz.*, No. 4, 54 (2006).
13. A. F. Alexandrov, G. E. Bugrov, K. V. Vavilin, I. Y. Kerimova, E. A. Kralkina, V. B. Pavlov, V. Yu. Plaksin, and A. A. Rukhadze, *Prikl. Fiz.*, No. 2, 41 (2006).
14. A. K. Petrov, Candidate's Dissertation in Mathematics and Physics (Moscow, 2016).
15. Yu. M. Aliev and M. Krämer, *Physics of Plasmas* **23**, 103505 (2016).
16. Sh. M. Tysk, C. M. Denning, J. E. Scharer, and K. Akhtar, *Physics of Plasmas* **11**, 878 (2003).
17. R. W. Boswell, *Phys. Lett. A.* **33**, 457 (1970).
18. R. W. Boswell, *Plasma Phys. Controlled Fusion*, No. 26, 1147 (1984).
19. A. W. Degening, C. O. Jung, R. W. Boswell, and A. R. Ellingboe, in *1996 Space Plasma & Plasma Processing Group, Plasma Research School of Physical Sciences and Engineering* (Australian National University, Canberra, Australia, 1996).
20. L. Chang, M. J. Hole, J. F. Caneses, G. Chen, B. D. Blackwell, and C. S. Corr, *Physics of Plasmas* **19**, 083511 (2012).
21. Ch. Niu, G. Zhao, Yu Wang, L. Zh Zhongwei, and Q. Chen, *Physics of Plasmas* **24**, 013518 (2017).
22. Ch. A. Lee, G. Chen, A. V. Arefiev, R. D. Bengtson, and B. N. Breizman, *Physics of Plasmas* **18**, 013501 (2011).
23. C. M. Franck, O. Grulke, A. Stark., T. Klinger, E. E. Scime, and G. Bonhomme, *Plasma Sources Sci. Technol.* **14**, 226 (2005).
24. K. P. Shamrai, V. P. Pavlenko, and V. B. Taranov, *Plasma Physics and Controlled Fusion* **39** (3), 505 (1997).
25. M. V. Kuzeev, *Wave phenomena in media with dispersion* (LENAND, 2017).
26. *Plasma Diagnostic Techniques*. Ed. By R. H. Huddleston, L. S. Leonard (Academic, New York, 1965).
27. A. F. Aleksandrov, G. E. Bugrov, K. V. Vavilin, I. F. Kerimova, S. G. Kondranin, E. A. Kral'kina, V. B. Pavlov, V. Y. Plaksin, and A. A. Rukhadze, *Plasma Physics Reports* **30** (5), 398 (2004).
28. E. A. Kralkina, *Physics-Uspekhi* **51** (5), 493 (2008).
29. M. A. Lieberman and A. J. Lichtenberg, *Principles of plasma discharges and materials processing* (Hoboken New Jersey. John Wiley & Sonc, Inc., 2005).
30. P. Chamber and N. Braitwaite, *Physics of Radiofrequency Plasmas* (N Y., 2011).
31. V. M. Donnelly and A. Kornblit, *J. Vac. Sci. Technol.* **31** (5), 050825 (2013).
32. E. A. Kralkina and A. M. Nikonov, *Prikl. Fiz.*, No. 6, 20 (2007).
33. V. F. Semeniuk, G. N. Veremeychenko, V. F. Virko, and V. M. Slobodian, in *Proc. IX International Scientific and Technical Conference "Vacuum equipment, Materials and Technology"* (Moscow, 2014), pp. 47–53.