ХИМИЧЕСКАЯ ФИЗИКА, ФИЗИЧЕСКАЯ КИНЕТИКА И ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

Параметры плазмы в ВЧ индуктивном двухкамерном источнике малой мощности при наличии внешнего магнитного поля

А.К. Петров^{*a*}, К.В. Вавилин, Г.П. Козлов, Е.А. Кралькина, П.А. Неклюдова, А.М. Никонов, В.Б. Павлов

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, кафедра физической электроники. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2. E-mail: ^a alpetrov57@gmail.com

Статья поступила 10.04.2015, подписана в печать 06.07.2015.

В настоящей работе представлены результаты исследования параметров плазмы в высокочастотном (ВЧ) индуктивном двухкамерном источнике плазмы, помещенном во внешнее магнитное поле. Рассмотрен диапазон давлений аргона $5 \cdot 10^{-5} - 6 \cdot 10^{-2}$ торр, индукции магнитного поля 0-60 Гс, мощностей ВЧ-генератора 25-300 Вт. В ходе экспериментов было обнаружено резонансное поглощения ВЧ-мощности в зависимости от величины магнитного поля, а также соответствие локальных максимумов поглощения ВЧ-мощности локализованным в пространстве максимумам концентрации электронов. Сопоставление результатов экспериментов с результатами численных расчетов дало основания полагать, что резонансный характер разряда связан с возбуждением пространственных мод связанных геликонных и косых ленгмюровских волн.

Ключевые слова: плазма, геликон, косая ленгмюровская волна, индуктивный, ВЧ. УДК: 533.9.03, 537.533.79. PACS: 52.35.Hr, 52.50.Dg, 52.50.Qt.

Введение

В настоящее время в литературе [1-7] большое внимание уделяется исследованию индуктивного ВЧ-разряда, помещенного во внешнее магнитное поле. Большой интерес к исследованию разряда вызван, во-первых, возможностью получения плотной плазмы при невысоких энергозатратах, что востребовано в большом количестве практических приложений, а во-вторых, многообразием физических процессов, протекающих в разряде. Первая экспериментальная работа, продемонстрировавшая резонансное увеличение плотности плазмы в индуктивном разряде при наличии внешнего магнитного поля, была опубликована Р. Босвеллом [1] в 1970 г. Исследуя структуру и прохождение волн в плазме в диапазоне частот 7-10 МГц, Босвеллу и его коллегам удалось получить плазму с концентрацией порядка 10¹³ см⁻³ на оси источника диаметром 10 см при ВЧ-мощности, не превосходящей 1 кВт [8-11]. Магнитное поле составляло величину порядка 1 кГс. Высокая концентрация плазмы, полученная при относительно небольших ВЧ-мощностях, поставила вопрос о механизме поглощения ВЧ-мощности плазмой. Поиск ответа на этот вопрос продолжается и в наши дни. Значительный вклад в теоретический анализ проблемы внес Ф. Чен [2]. Он показал, что в плазме могут возбуждаться бегущие волны геликоны. Чен предположил [2], что в результате взаимодействия волна-частица в плазме возникает группа резонансных электронов, скорость которых близка к фазовой скорости волны. В источниках плазмы с типичными для экспериментов размерами

скорость резонансных электронов оказывается выше, чем средняя тепловая. Это повышает эффективность ионизации атомов и снижает энергозатраты на образование электрон-ионной пары, что позволяет объяснить экспериментальные данные Босвелла.

Работа [2] и предложенный в ней механизм поглощения ВЧ-мощности послужили толчком к появлению многочисленных экспериментальных работ [12], посвященных поиску быстрых электронов в геликонной плазме. Полученные результаты можно разделить на две группы. Авторы первой группы работ на основании прямых или косвенных данных подтвердили гипотезу о генерации быстрых электронов в геликонной плазме [12-19]. Авторы второй группы работ [20-22] не обнаружили отличий энергетического распределения электронов от функции распределения Максвелла. Надо отметить, что вторую группу работ отличает тщательная подготовка эксперимента и учет многочисленных факторов, которые могли привести к систематическим погрешностям в экспериментальных методиках работ первой группы. В работе [21] Чен констатирует, что предложенный им механизм поглощения геликонных волн не нашел экспериментального подтверждения, а причинную связь между быстрыми электронами, обнаруженными в работах [22], и геликонными волнами считает недоказанной. Тем не менее, работы по поиску группы быстрых электронов и обсуждение их роли в поглощении ВЧ-мощности геликонной плазмой продолжаются и в настоящее время [23-24].

Принципиально другой подход к проблеме поглощения ВЧ-мощности геликонной плазмой был предложен в середине 1990-х гг. в работах [7, 25-26]. В них было показано, что в ограниченных источниках плазмы возбуждаются две связанные между собой волны, а именно геликоны и косые ленгмюровские волны. Выполненные численные расчеты [27] позволили выделить при низких давлениях три области существования разряда, различающиеся характером возбуждаемых волн. При низких концентрациях электронов (как правило, менее 10¹⁰ см⁻³) ВЧ-поля косой ленгмюровской волны проникают в объем плазмы, в то время как геликон является поверхностной волной. При повышении плотности плазмы ВЧ-поля обеих волн проникают вглубь плазмы. В первом и втором случаях поглощение ВЧ-мощности плазмой разряда определяется бесстолкновительной диссипацией энергии косой ленгмюровской волны. И наконец, при высокой концентрации плазмы, более 10^{12} см⁻³, когда подключаются электрон-ионные столкновения, косая ленгмюровская волна становится поверхностной, в то время как ВЧ-поля геликона проникают в объем плазмы. В последнем случае роль косой ленгмюровской волны в поглощении плазмы понижается.

В настоящее время основной объем исследований, выполненный в литературе, соответствует высоким величинам ВЧ-мощности и индукции внешнего магнитного поля, при которых роль косой ленгмюровской волны понижена [2, 17, 28–31]. Однако решение ряда практических задач по разработке технологических источников плазмы требует реализации разряда при относительно небольших значениях ВЧ-мощности и индукции магнитного поля. В данной области параметров свойства индуктивного ВЧ-разряда, помещенного во внешнее магнитное поле, изучены далеко не полностью.

В связи с вышеизложенным в настоящей работе выполнены экспериментальные исследования эффективности поглощения ВЧ-мощности и пространственного распределения концентрации плазмы в двухкамерном источнике плазмы в области низких значений мощности ВЧ-генератора и магнитных полей 0–60 Гс. Конструкция двухкамерного источника плазмы была выбрана близкой к использованной в работах [32–37] в экспериментах с более высокими значениями ВЧ-мощности и индукции внешнего магнитного поля.

1. Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Ранее установка была подробно описана в статьях [38–39]. Индуктивный ВЧ-разряд зажигался в источнике плазмы, состоящем из двух цилиндрических камер разного диаметра. Верхняя часть источника плазмы, изготовленная из стекла, имела диаметр 8 см и высоту 25 см. Нижняя часть источника, изготовленная из кварца, имела диаметр 46 см и высоту 30 см.

Ввод ВЧ-мощности осуществлялся с помощью спиральной антенны, которая располагалась на боковой поверхности верхней части источника плазмы на расстоянии 12–16 см от ее верхнего торца. Концы антенны подсоединялись к выходу автоматической системы согласования, в свою очередь подключенной к ВЧ-генератору AE Cesar 1310 с рабочей часто-



Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — вакуумная камера, 2 — турбомолекулярный насос, 3 — форвакуумный насос, 4 — широкодиапазонный датчик измерения давления WRG-S-NW25 S/S, 5 — зонды Ленгмюра, 6 — линейка с отверстиями для фиксации световода, 7 — световод, 8 — пояс Роговского, 9 — емкостный делитель

той 13.56 МГц и выходной мощностью 0–1000 Вт. Для измерения тока, текущего по антенне, использовался пояс Роговского.

Два электромагнита, позволяющие создавать в нижней камере однородное в пределах 7 % магнитное поле с индукцией 0–6 мТл, были расположены в верхней и нижних частях вакуумной камеры.

2. Методики измерений

2.1. Методика измерения эквивалентного сопротивления

Для измерения фактической ВЧ-мощности, поглощенной плазмой, использовался метод, подробно описанный в работе [40].

Основанием для нахождения $P_{\rm pl}$ — мощности, поглощенной плазмой, явилась формула, связывающая мощность ВЧ-генератора $P_{\rm gen}$ с током I, текущим по антенне, активным сопротивлением $R_{\rm ant}$ внешней цепи и эквивалентным сопротивлением плазмы $R_{\rm pl}$

$$P_{\text{gen}} = rac{1}{2}(R_{ ext{ant}} + R_{ ext{pl}}) \cdot I^2$$

В процессе экспериментов сначала определялось активное сопротивление внешней цепи по формуле

$$R_{ant} = 2P_{gen}/I_0^2$$

где $P_{\rm gen}$ — мощность ВЧ-генератора, отдаваемая во внешнюю цепь, I_0 — ток через антенну без разряда. Затем измерялись значения тока антенны при конкретных условиях экспериментов и вычислялись значения $P_{\rm pl}$ по формуле

$$P_{\rm pl} = \left(P_{\rm gen} / I^2 - \frac{1}{2} R_{\rm ant} \right) \cdot I^2.$$

Для измерения тока I, текущего через антенну, использовался пояс Роговского. Конструкционные особенности пояса Роговского, используемого в настоящей работе, были следующие: фторопластовое кольцо размером ($D32 \times d17 \times H8$) с намоткой из 50 витков медной проволоки диаметром 0.3 мм с «обратным кольцом», расположенным параллельно измеряемому току, для компенсации магнитного потока. В целях уменьшения емкостной связи с внешними цепями данная конструкция помещается в медный корпус. Сопротивление (R = 12 Ом), на которое нагружена медная проволока, подбирается с учетом выполнения неравенства

$$r + R \ll L\omega$$
,

где r, L — сопротивление и индуктивность обмотки, ω — частота. Напряжение, генерируемое на выходе пояса Роговского, пропорционально амплитуде ВЧ-тока.

2.2. Методика зондовых измерений

Для контроля параметров плазмы проводились измерения с помощью зондов Ленгмюра. Зонды представляли собой остеклованную вольфрамовую проволоку диаметром 0.3 мм, свободную на конце от стекла на расстоянии 5 мм. Два зонда были вварены в боковую поверхность верхней части источника плазмы. Еще два зонда были установлены на различной высоте по оси в нижней части источника плазмы. Зонды Ленгмюра располагались на оси источника плазмы на расстояниях 8, 18, 36 и 53 см от верхнего торца источника плазмы соответственно. Опорный зонд для проведения зондовых измерений находился вблизи верхнего торца источника плазмы.

При проведении зондовых измерений использовалась стандартная методика измерений [41–42]. Для подавления ВЧ-составляющих зондового тока, искажающих измеряемую кривую, использовались резонансные фильтры, имевшие высокое сопротивление на первой и второй гармониках рабочей частоты. Сигналы, пропорциональные зондовому току и разности потенциалов между зондом и опорным электродом, поступали на вход АЦП, встроенный в компьютер.

Известно, что наличие внешнего магнитного поля может привести к искажению зондовых характеристик. Однако в настоящей работе при проведении зондовых измерений использовались магнитные поля менее 6 мТл. При таких полях ларморовский радиус много больше радиуса Дебая, что позволило использовать стандартную методику обработки результатов экспериментов.

2.3. Методика спектральных измерений

Для измерения интенсивности свечения плазмы ее излучение с помощью световода направлялось на входную щель монохроматора МДР-23, ширина входной и выходной щелей которого составляла 50 мкм. На выходе монохроматора был установлен фотоэлектронный умножитель ФЭУ-100. Сигнал с выхода фотоумножителя регистрировался с помощью платы АЦП, встроенной в компьютер. Сканирование спектра проводилось в диапазоне 4000-6000 Å.

Непосредственно измеренная интенсивность свечения плазмы в нашей постановке эксперимента определяется выражением

$$I(z) = C \int n_e(r, z) n_0 \int f(\varepsilon, r, z) q(\varepsilon) \sqrt{\varepsilon} \, d\varepsilon \, dr, \qquad (1)$$

где интегрирование по *dr* соответствует тому, что мы измеряем усредненную по лучу зрения (в данном случае по радиусу источника плазмы) интенсивность. Из (1) следует, что при условии постоянства концентрации атомов и энергетического распределения электронов в объеме источника плазмы аксиальная зависимость интенсивности свечения плазмы представляет собой аксиальную зависимость плотности плазмы, усредненной по радиусу источника.

3. Результаты экспериментов

Как отмечалось выше, цель настоящей работы состоит в изучении параметров индуктивного ВЧ-ис-

точника плазмы при низких значениях вкладываемой ВЧ-мощности, когда основной вклад в ее поглощение вносит косая ленгмюровская волна, возбуждаемая в пространственно ограниченных источниках плазмы одновременно с геликоном. Известно, что ВЧ-разряд, возбуждаемый индуктором, загорается в емкостной моде, а затем по мере роста мощности ВЧ-генератора переходит в индуктивную моду. Для того чтобы найти оценку снизу величины мощности генератора Pgen, при которой реализуется индуктивная мода ВЧ-разряда, была измерена зависимость интенсивности свечения плазмы от Pgen. Измерения показали, что ВЧ-разряд переходит в индуктивную моду при значениях Pgen > 80 Вт. В связи с этим в настоящей работе все измерения были выполнены при мощностях ВЧ-генератора, превышающих 100 Вт.

На рис. 2 изображена зависимость вложенной в плазму ВЧ-мощности от величины внешнего магнитного поля. Измерения показали, что функция $P_{\rm pl}(B)$ является немонотонной и носит явно выраженный резонансный характер, что свидетельствует о возбуждении в условиях экспериментов геликонов и косых ленгмюровских волн.



Рис. 2. Зависимость вложенной мощности от величины магнитного поля. Мощность ВЧ-генератора 150 Вт, давление аргона 2.7 · 10⁻⁴ торр

Эксперименты, выполненные при давлении аргона ниже 1 мторр и $P_{\rm gen} > 100$ Вт, показали, что наложение внешнего магнитного поля приводит к существенным изменениям протяженности разряда. Так, при отсутствии магнитного поля разряд концентрируется в верхней газоразрядной камере. По мере увеличения индукции магнитного поля разряд начинает проникать в нижнюю часть источника плазмы, длина интенсивно светящейся части разряда в нижней камере начинает расти и, наконец, при B > 20 Гс разряд замыкается на нижний фланец, формируя протяженный плазменный столб. Диаметр плазменного столба примерно равен диа-

метру верхней части источника плазмы. Сказанное иллюстрирует рис. 3, где представлена зависимость интенсивности свечения линии аргоновой плазмы ($\lambda = 4200$ Å), измеренной на различных расстояниях от торцевой поверхности верхней части источника плазмы, от индукции внешнего магнитного поля. Как видно, при B < 20 Гс интенсивность свечения плазмы в верхней части источника плазмы (z < 25 см) существенно превосходит ту же величину, характерную для нижней части источника плазмы (z > 25 см). Необходимо отметить, что при B > 30 Гс интенсивность свечения разряда в нижней части источника почти в два раза выше, чем при z < 25 см.



Рис. 3. Зависимость интенсивности свечения аргоновой плазмы ($\lambda = 4200$ Å), измеренной на различных расстояниях от торца верхней камеры, от величины внешнего магнитного поля. Мощность ВЧ-генератора 150 Вт, давление аргона $2.5\cdot 10^{-4}$ торр

На рис. 4 представлены распределения концентрации электронов, измеренные на оси источника плазмы на различных расстояниях от верхнего торца



Рис. 4. Распределение концентрации плазмы в зависимости от величины внешнего магнитного поля. Мощность ВЧ-генератора 150 Вт, давление аргона $2.7\cdot 10^{-4}$ торр



Рис. 5. Зависимости электронного тока от потенциала зонда: *а* — для случая максвелловского распределения электронов по энергиям, *б* — при наличии немаксвелловской «быстрой» группы электронов. Параметры как на рис. 4

источника, в зависимости от величины внешнего магнитного поля. Как видно, результаты, полученные зондовым методом, качественно совпадают с результатами измерений интенсивности свечения плазмы. При индукции магнитного поля 10 Гс наибольшие значения концентрации электронов наблюдаются в верхней части источника плазмы, однако при магнитных полях более 20 Гс, когда разряд замыкается на нижний фланец, концентрация электронов в нижней части источника плазмы становится существенно выше, чем в верхней части. Во всех рассмотренных точках на оси источника плазмы зависимость концентрации электронов от магнитного поля носит немонотонный характер, однако положения локальных максимумов ne в различных областях столба не совпадают друг с другом.

Остановимся более подробно на зависимости электронного тока на зонд от потенциала зонда относительно опорного электрода, являющейся источником информации о функции распределения электронов по энергиям. В ходе экспериментов было установлено, что вблизи потенциала пространства электронный ток на зонд $I_e(U)$, представленный в полулогарифмическом масштабе, в пределах погрешности эксперимента можно аппроксимировать прямой, что свидетельствует о близости функции распределения медленных электронов по энергиям к максвелловскому распределению (рис. 5, *a*).

Необходимо отметить, что при индукции внешнего магнитного поля более 40 Гс при z = 18 и 36 см в области больших значений потенциала зонда на зависимости $\ln(I_e)$ от U появляется второй наклон, который может свидетельствовать о наличии группы быстрых электронов (рис. 5, δ). «Температура» быстрых электронов T_{ef} , найденная из второго наклона кривой $\ln(I_e)$ для z = 18 см, близка к значению, полученному для z = 36 см, и составляет для разных значений магнитного поля величину от 20 до 35 эВ. Необходимо отметить, что при z = 8 и 53 см второй наклон $\ln(I_e)$ не был обнаружен при всех рассмотренных значениях магнитного поля. Кроме того, надо отметить, что второй наклон $\ln(I_e)$ появляется в области плавающего потенциала зонда, где точность определения электронного тока существенно падает.

На рис. 6 представлена зависимость температуры медленных электронов от индукции внешнего магнитного поля в различных точках на оси источника плазмы. Обращает на себя внимание, что при условиях формирования плазменного столба температура электронов выравнивается вдоль оси источника плазмы.



Рис. 6. Электронная температура, рассчитанная с помощью зондов Ленгмюра. Параметры как на рис. 4

Результаты, представленные выше, были получены при давлениях менее 1 мторр. Увеличение давления до 1 мторр и выше показало, что формирования протяженного плазменного столба даже при наибольшем из рассмотренных магнитных полей не происходит, причем длина ярко светящейся части разряда уменьшается с ростом давления. Так, на



Рис. 7. Зависимость интенсивности спектральной линии аргона 4200 Å от расстояния вдоль оси источника. Мощность ВЧ-генератора 150 Вт

рис. 7 приведена зависимость интенсивности спектральной линии аргона 4200 Å от расстояния вдоль оси источника для разных значений расхода рабочего тела при наличии внешнего магнитного поля в 50 Гс.

4. Обсуждение результатов

В рассмотренных диапазонах индукции внешнего магнитного поля и мощностей ВЧ-генератора выполняется неравенство

$$\omega_{\mathrm{L}i} \leqslant \omega \leqslant \Omega_e \leqslant \omega_{\mathrm{L}e},\tag{2}$$

где ω_{Li} , ω , Ω_e , ω_{Le} — ионная ленгмюровская, круговая рабочая, электронная циклотронная и ленгмюровская частоты. В этом случае возможно резонансное возбуждение связанных между собой геликонной и косой ленгмюровской волн. В низкочастотном пределе ($\omega \ll \Omega_e$) известен спектр косой ленгмюровской волны [43]:

$$\omega \simeq rac{k_z \omega_{\mathrm{L}e}}{\sqrt{k^2 + k_\perp^2 \omega_{\mathrm{L}e}^2 / \Omega_e^2}}.$$

В пределе плотной плазмы ($\omega_{\text{L}e}^2 \gg \Omega_e^2$) эта формула принимает вид [43]

$$\omega^2 = \frac{k_z^2}{k_\perp^2} \Omega_e^2.$$

Геликон — это поперечная волна и в низкочастотном пределе имеет вид [43]

$$\omega = \frac{k_z^2 c^2 \Omega_e}{\omega_{\mathrm{L}e}^2}.$$

Плазма, помещенная во внешнее магнитное поле, является анизотропной средой, и говорить о продольных и поперечных волнах можно только в пределе малых фазовых скоростей волн. Если плазма ограничена, то такие волны связываются, и их приближенно можно «расцепить» только в длинных системах, когда поперечный размер много меньше продольного размера системы.

В работах [44-45] были построены теоретическая и численная модели ограниченного цилиндрического источника плазмы, условия поддержания разряда в котором подчиняются неравенству (2). Было получено, что высокочастотные поля в плазме представляют собой линейную комбинацию двух решений. Численные расчеты показали, что при частоте 13.56 МГц и магнитных полях более 20 Гс у первого решения азимутальное электрическое поле существенно ниже радиального и аксиального, в то время как у второго решения исчезающе мало электрическое продольное поле. Это дает основания сопоставить первое решение с квазипродольной косой ленгмюровской волной, а второе с квазипоперечной — геликоном.

На рис. 8 показаны результаты расчета ВЧ-полей, возбуждаемых в цилиндрическом источнике плазмы диаметром 10 и длиной 50 см азимутальным током, текущим по боковой поверхности источника плазмы. Расчет полей проводился с помощью программы [46] для средней по объему концентрации плазмы 10¹⁰ см⁻³. Как видно, наибольшее значение при условиях эксперимента достигают ВЧ радиальные поля Er, причем при магнитных полях менее 60 Гс значения E_r геликона и косой ленгмюровской волны близки. При В > 60 Гс поля косой ленгмюровской волны становятся преобладающими. Сравнение результатов численного моделирования с экспериментальными данными показывает их хорошее качественное согласие. Это дает основание полагать, что в исследуемом эксперименте происходит резонансное возбуждение геликона и косой ленгмюровской волны, что отражается в резонансном характере поглощения ВЧ-мощности.



Рис. 8. Зависимость электрического поля от магнитного поля для косых ленгмюровских и геликонных волн

Резонансный характер поглощения ВЧ-мощности целесообразно сопоставить с зависимостью концентрации электронов *n_e* от величины магнитного поля (рис. 4). Во всех рассмотренных областях на оси

плазменного столба наблюдается немонотонная зависимость плотности плазмы от магнитного поля. Однако положение локальных максимумов n_e в различных областях столба не совпадают друг с другом. Так в верхней части колбы локальные максимумы наблюдаются при относительно низких значениях магнитного поля. При z = 18 и 36 см максимумы концентрации выражены более отчетливо и наблюдаются при больших значениях В. Полученные результаты дают основание предположить, что при изменении величины внешнего магнитного поля происходит возбуждение различных пространственных мод волн. Изменение магнитного поля приводит к изменению локализации области вложения мощности в плазму и, как следствие, к немонотонному изменению концентрации электронов в различных точках плазменного столба. Близкий результат был получен в работе [47].

В разд. З отмечалось, что при магнитных полях 40 Гс и выше, т.е. при условиях, когда при z = 18 и 36 см наблюдаются локальные максимумы концентрации электронов, на зондовых кривых, представленных в полулогарифмическом масштабе, появляется «второй наклон», свидетельствующий о появлении в разряде группы быстрых электронов. Аналогичный результат при работе с более высокой концентрацией плазмы наблюдался в работах [24]. К сожалению, полученных экспериментальных данных недостаточно, чтобы однозначно связать появление группы быстрых электронов в разряде с генерацией волн. Причиной наличия быстрых электронов в плазме источника может быть и паразитная емкостная связь между антенной и заземленными электродами и антенной и плазмой.

В заключение рассмотрим качественно физические процессы, приводящие к образованию столба в источнике плазмы при магнитных полях более 20 Гс. Ток, текущий по антенне, возбуждает разряд. При отсутствии магнитного поля электроны рождаются главным образом в объеме верхней части источника, где ВЧ-поля максимальны. Электроны гибнут на стенках как верхней, так и нижней части источника, куда попадают в силу хаотичности своего движения. При наличии внешнего магнитного поля электроны замагничиваются и начинают двигаться вдоль силовых линий. При условии, что длина свободного пробега электронов больше высоты источника плазмы, электроны выходят из верхней части источника и достигают нижнего фланца источника плазмы практически без столкновений. Движение электронов поперек магнитного поля затруднено, поэтому гибель электронов на стенках источника плазмы понижается и наблюдается резко очерченный в радиальном направлении плазменный столб. Рост давления сопровождается снижением длины свободного пробега электронов, уменьшением энергии электронов и интенсивности свечения плазмы по мере удаления от антенны. Возбуждение волн

в плазменном столбе приводит к изменению положения области локализации вложения ВЧ-мощности.

Приведенные выше соображения дают основание представить разряд в виде эквивалентной электрической схемы, изображенной на рис. 9. Разряд в верхней части источника плазмы представлен в виде трансформаторной модели, предложенной в работах [48–50]. Разряд может замыкаться на нижний заземленный фланец, в связи с этим в эквивалентную схему включена ветвь, состоящая из активного сопротивления R_2 , индуктивности L_2 и емкостей C_1 и C_2 . Емкость C_1 в эквивалентной схеме появляется благодаря наличию емкости между витками антенны и заземленным фланцем, а емкость C_2 — в силу существования слоя между плазмой и металлическим фланцем.



Рис. 9. Эквивалентная схема разряда

При отсутствии магнитного поля и высоких давлениях аргона импеданс нижней ветви разряда велик, в результате чего ток замыкается через верхнюю часть эквивалентной схемы. Наличие внешнего магнитного поля увеличивает концентрацию электронов в нижней части источника плазмы, что приводит к понижению импеданса нижней ветви разряда и увеличению тока, замыкающегося через нижнюю часть схемы.

Заключение

1. В результате экспериментальных исследований свойств индуктивного ВЧ-разряда с внешним однородным магнитным полем, выполненных с источником плазмы сложной геометрии, было обнаружено существенное перераспределение параметров плазмы в зависимости от рабочего давления и величины индукции внешнего магнитного поля: При давлениях, меньших 1 мторр, и значениях магнитной индукции более 20 Гс (что соответствует условиям, когда электроны замагничены, а длина свободного пробега электронов в направлении, параллельном магнитному полю, оказывается больше характерных размеров источника плазмы) разряд принимал форму плазменного столба, радиус которого примерно соответствовал наименьшему из радиусов частей источника плазмы. Увеличение давления приводило к концентрации разряда в верхней части источника плазмы.

2. При изменении величины индукции однородного магнитного поля наблюдаются резонансные области поглощения ВЧ-мощности. Наличие подобных резонансных областей находится в согласии с результатами математического моделирования и соответствует резонансному возбуждению геликонов и косых ленгмюровских волн.

3. При изменении величины индукции внешнего магнитного поля в областях расположения ленгмюровских зондов наблюдается немонотонная зависимость плотности плазмы от магнитного поля со смещенными друг относительно друга положениями максимумов. Предположительно причиной данного явления является возбуждение различных пространственных мод геликонов и косых ленгмюровских волн, зависящих от величины магнитного поля, что ведет к изменению локализации области вложения мощности в плазму. При магнитных полях более 40 Гс наблюдается группа быстрых электронов.

Авторы выражают глубокую благодарность А.Ф. Александрову и А.А. Рухадзе за плодотворное обсуждение полученных результатов.

Список литературы

- 1. Boswell R.W. // Physics Letters. 1970. **33A**, N 7. P. 457.
- Chen F.F. // Plasma Physics and Controlled Fusion. 1991. 33, N 4. P. 339.
- Godyak V.A., Piejak R.B., Alexandrovich B.M. // Plasma Sources Sci. and Technol. 1994. 3. P. 169.
- Александров А.Ф., Воробьев Н.Ф., Кралькина Е.А. и др. // Журн. технич. физики. 1994. 64, № 11. С. 53.
- Shamrai K.P., Taranov V.B. // Plasma Sources Sci. and Technol. 1996. 5. P. 474.
- 6. Александров А.Ф., Воробьев Н.Ф., Бугров Г.Э. и др. // Прикл. физика. 1995. № 1. С. 3.
- Shamrai K.P., Aleksandrov A.F., Bougrov G.E. et al. // J. de Physique IV. 1997. 7. P. C4-365.
- Boswell R.W. // Plasma Physics and Controlled Fusion. 1984. 26, N 10. P. 1147.
- Boswell R.W., Henry D. // Appl. Phys. Lett. 1985. 47. P. 1095.
- Boswell R. W., Porteous R.K. // Appl. Phys. Lett. 1987.
 50. P. 1130.
- Boswell R.W., Porteous R.K. // J. Appl. Phys. 1987.
 62, N 8. P.3123.
- Boswell R.W., Zhu P. // Physics of Fluids B: Plasma Physics. 1991. 3. P. 869.
- Chen F.F., Decker C.D. // Plasma Physics and Controlled Fusion. 1992. 34, N 4. P. 635.
- Loewenhardtt P.K., Blackwell B.D., Hamberger S.M. // Plasma Physics and Controlled Fusion. 1995. 37, N 3. P. 229.
- 15. Shoji T., Mieno T., Kadota K. // International Seminar on Reactive Plasmas. Nagoya, Japan, 1991.
- Chen R.T.S., Breun R.A., Gross S. et al. // Plasma Sources Sci. and Technol. 1996. 4. P. 337.
- Ellingboe A.R., Boswell R.W., Booth J.P., Sadeghi N. // Physics of Plasmas. 1995. 2. P. 1807.
- Ellingboe A.R., Boswell R.W., Booth J.P., Sadeghi N. // Gaseous Electronics Conference. 1993. Montréal, Canada.

- Molvik A. W., Ellingboe A.R., Rognlien T.D. // Phis. Rev. Lett. 1997. 79, N 2. P. 233.
- Blackwell D.D., Chen F.F. // Bull. of the Amer. Phys. Soc. 37th Annual Meeting of the Division of Plasma Physics. Louisville, Kentucky, 1995.
- Chen F.F. // Plasma Physics and Controlled Fusion. 1997. 39. P. 1533.
- Sudit I.D., Chen F.F. // Plasma Sources Sci. and Technol. 1996. 4. P. 43.
- Sung Y-T., Li Y., Scharer J.E. // Physics of Plasmas. 2015. 22. P. 034503.
- Sahu B.B., Ganguli A., Tarey R.D. // Plasma Sources Sci. and Technol. 2014. 23. P. 065050.
- Александров А.Ф., Воробьев Н.Ф., Кралькина Е.А., Обухов В.А. и др. // Журн. технич. физики. 1994. 64, № 11. С. 53.
- Александров А.Ф., Воробьев Н.Ф., Бугров Г.Э. и др. // Прикл. физика. 1995. № 1. С. 3.
- 27. Кралькина Е.А. Дисс. ... докт. физ.-мат. наук. 2008.
- Tysk S.M., Denning C.M., Scharer J.E., Akhtar K. // Physics of Plasmas. 2003. 11, N 3. P. 878.
- Magee R.M., Galante M.E., Gulbrandsen N. et al. // Physics of Plasmas. 2012. 19. P. 123506.
- Ziemba T., Euripides P., Slough J. et al. // Plasma Sources Sci. and Technol. 2006. 15. P. 517.
- West M.D., Charles C., Boswell R.W. // J. Phys. D. Appl. Physics. 2009. 42, N 24. P. 245201.
- Chen F.F., Arnush D. // Los Angeles, California: UCLA LTP-002. 2000. Contract No. UC Micro Project 98-020.
- Chen F.F., Evans J.D., Tynan G.R. // Plasma Sources Sci. and Technol. 2001. 10, N 236. P. 49.
- 34. Corr C.S., Zanger J., Boswell R.W., Charles C. // Appl. Phys. Lett. 2007. 91. P. 241501.
- Charles C., Boswell R.W., Laine R., MacLellan P. // J. Phys. D. Appl. Physics. 2008. 41, N 6. P. 175213.
- Lafleur T., Charles C., Boswell R. W. // Physics of Plasmas. 2009. 16. P. 044510.
- Lafleur T., Boswell R. W., Charles C. // Physics of Plasmas. 2010. 17. P. 043505.
- Кралькина Е.А., Неклюдова П.А., Павлов В.Б., Вавилин К.В. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2014. № 1. С. 84. (Kralkina E.A., Nekliudova P.A., Pavlov V.B., Vavilin K.V. // Moscow University Phys. Bull. 2014. 69, N 1. P. 92.)
- Кралькина Е.А., Неклюдова П.А., Павлов В.Б. и др. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2014. № 1. С. 79. (Kralkina E.A., Nekliudova P.A., Pavlov V.B., Vavilin K.V. et al. // Moscow University Phys. Bull. 2014. 69, N 1. P. 86.)
- 40. Кралькина Е.А. // Успехи физ. наук. 2008. 51. С. 493.
- 41. Хаддлстоун Р., Леонард С. Диагностика плазмы. М., 1967.
- 42. Shott L. Electrical probes. Plasma diagnostics. N.Y., 1995.
- 43. Александров А.Ф., Рухадзе А.А. Лекции по электродинамике плазмоподобных сред. М., 1999.
- 44. Александров А.Ф., Бугров Г.Э., Вавилин К.В. и др. // Физика плазмы. 2004. **30**, № 5. С. 434. (Aleksandrov A.F., Bugrov G.E., Vavilin K.V. et al. // Plasma Phys. Reports. 2004. **30**, N 5. P. 398.)
- 45. Вавилин К.В., Рухадзе А.А., Ри М.Х., Плаксин В.Ю. // Журн. технич. физики. 2004. 74, № 5. С. 44; 75, № 6. С. 25. (Vavilin K.V., Rukhadze А.А., Ri М.Кh., Plaksin V.Yu. // Plasma Phys. Reports. 2004. 30, N 8. Р. 687.)
- 46. Вавилин К.В. Дисс. ... канд. физ.-мат. наук. 2005.

47. Семенюк В.Ф., Веремейченко Г.Н., Вирко В.Ф., Слободян В.М. // IX Междунар. науч.-техн. конф. «Вакуумная техника, материалы и технология». М., 2014.

48. Thomson J.J. // Philos. Mag. 1927. 4, N 25. P. 1128.

- 49. Gudmundsson J.T., Lieberman M.A. // Plasma Sources Sci. and Technol. 1997. 6. P. 540.
- 50. Godyak V.A., Piejak R.B., Alexandrovich B.M. // Plasma Sources Sci. and Technol. 1994. 3. P. 169.

Plasma parameters in a dual-camera low-power inductive RF discharge with an external magnetic field

A. K. Petrov^a, K. V. Vavilin, G. P. Kozlov, E. A. Kralkina, P. A. Nekliudova, A. N. Nikonov, V. B. Pavlov

Department of Physical Electronics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia. E-mail: ^a alpetrov57@gmail.com.

The results from studying a dual-camera inductive radio-frequency (RF) discharge that was placed in an external magnetic field are presented. The operating conditions were as follows: an argon pressure of $5 \cdot 10^{-5} - 6 \cdot 10^{-2}$ Torr, an external magnetic field strength of 0-60 G, and an RF generator power supply of 25-300 W. During the experiment the resonant RF power consumption and the correspondence between the local power-consumption maxima and spatial maxima of the plasma concentration as a function of the external magnetic field were observed. The comparison of the experimental results with the results of the mathematical simulation indicates that the resonant character of the discharge is associated with the excitation of helicons and Trivelpiece-Gould waves.

Keywords: plasma, helicon, Trivelpiece-Gould wave, inductive, RF. PACS: 52.35.Hr, 52.50.Dg, 52.50.Qt. Received 10 April 2015.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 6(2015).

Сведения об авторах

1. Петров Александр Кириллович — аспирант; тел.: (495) 939-47-73, e-mail: alpetrov57@gmail.com.

- 1. Вавилин Константин Викторович канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник; тел.: (495) 939-47-73, e-mail: viline@inbox.ru.
- 2. Козлов Григорий Петрович студент; тел.: (495) 939-47-73, e-mail: dazdrakogr@yandex.ru.
- 3. Кралькина Елена Александровна доктор физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-47-73, e-mail: ekralkina@mail.ru.
- 4. Неклюдова Полина Алексеевна мл. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-47-73, e-mail: nekludova_pa@mail.ru. 5. Никонов Александр Михайлович — аспирант; тел.: (495) 939-47-73, e-mail: nikonov207@mail.ru.
- 6. Павлов Владимир Борисович канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-47-73, e-mail: vb_pavlov@mail.ru.