

Исследование индуктивного ВЧ-разряда как самосогласованной системы.

Часть II*. Исследование параметров плазмы и эффективности поглощения ВЧ-мощности плазмой индуктивного ВЧ-разряда низкого давления

*А. Ф. Александров, Г. Э. Бугров, К. В. Вавилин, И. Ф. Керимова, Е. А. Кралькина,
В. Б. Павлов, В. Ю. Плаксин*

Физический факультет МГУ, Москва, Россия

А. А. Рухадзе

Институт общей физики РАН, Москва, Россия

Предпринята попытка объяснить особенности поведения ВЧ-разряда как при отсутствии, так и при наличии магнитного поля с единой позиции, представив разряд как самосогласованную систему, в которой доля ВЧ-генератора, поглощаемая плазмой, определяется параметрами самой плазмы. Представлены результаты совместного экспериментального исследования параметров плазмы и эффективности поглощения ВЧ-мощности плазмой аргона низкого давления (1,6–5 мТорр) без магнитного поля, при магнитных полях, соответствующих условиям ЭЦР и условиям возбуждения в плазме геликонов и волн Трайвелписа-Голда.

В последнее время внимание многих исследователей привлекает ВЧ индуктивный разряд низкого давления как без, так и при наличии внешнего магнитного поля. Это обусловлено, во-первых, "богатой" физикой разряда, во-вторых, большими перспективами его использования в прикладных задачах.

Анализ экспериментальных данных по исследованию индуктивного ВЧ-разряда и сравнение результатов, выполненных разными авторами, часто не представляются возможными, так как в работах точно не зафиксированы условия эксперимента, что неоднократно отмечалось в литературе [1, 2]. Речь идет о наличии неучтенных "скрытых" факторов, влияющих на условия эксперимента. К ним относятся, например, наличие емкостной составляющей разряда, металлических кожухов и установочных фланцев источников плазмы, в которых возможно возбуждение индукционных токов, разогрев системы согласования и т. д. Перечисленные факторы влияют на величину и способ вложения ВЧ-мощности в плазму, а следовательно, на измеряемые параметры плазмы. Они могут приводить к невоспроизводимости работы источников последней как от эксперимента к эксперименту, так и в составе различных технологических установок, а главное, они могут привести к искажению физической картины процессов, происходящих в разряде.

Часть I опубликована в журнале "Прикладная физика", № 4, 2005.

В настоящей серии статей сделана попытка объяснить особенности поведения индуктивного ВЧ-разряда как при отсутствии, так и при наличии магнитного поля с единой позиции, представив разряд как самосогласованную систему, в которой мощность ВЧ-генератора перераспределяется между двумя каналами: плазмой и активными элементами внешней цепи, причем доля мощности, поглощаемая плазмой, зависит от параметров самой плазмы. Первая работа серии [2] содержит описание ряда особенностей поведения разряда, обнаруженных как в экспериментах авторов цикла, так и в работах других авторов, стимулировавшая появление всего цикла исследований. В настоящей, второй, работе цикла представлены результаты совместного экспериментального исследования параметров плазмы и эффективности поглощения ВЧ-мощности плазмой аргона низкого давления (1,6–5 мТорр) без магнитного поля, а также при магнитных полях, соответствующих условиям ЭЦР и условиям возбуждения в плазме геликонов и волн Трайвелписа-Голда.

Эквивалентная схема разряда

Хорошо известно [3], что при чисто индуктивном возбуждении ВЧ-разряда при отсутствии внешнего магнитного поля его эквивалентную схему можно представить в виде, изображенном на рис. 1, а. ВЧ-генератор нагружен на трансформатор, первичная обмотка которого состоит

из антенны, по которой течет ток, создаваемый генератором, а вторичная обмотка представляет собой ток, индуцированный в плазме. Трансформаторную схему можно легко свести к схеме [3], представляющей собой последовательно соединенные активное сопротивление и индуктивность антенны, эквивалентное сопротивление и индуктивность плазмы (см. рис. 1, б), так что мощность ВЧ-генератора P_{Gen} оказывается связанный с мощностью, выделяемой в антenne P_{ant} и плазме P_{pl} , следующими выражениями:

$$\begin{aligned} P_{Gen} &= P_{ant} + P_{pl}; \\ P_{Gen} &= I^2 (R_{ant} + R_{pl}), \end{aligned} \quad (1)$$

где R_{ant}, R_{pl} — активное сопротивление антенны и эквивалентное сопротивление плазмы, соответственно;
 I — ток, текущий через антенну.

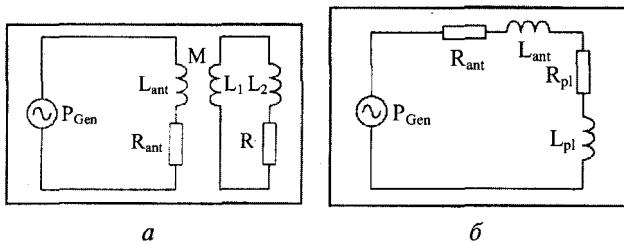


Рис. 1. Схема индуктивного ВЧ-разряда:
а — эквивалентная, б — трансформаторная

Заметим, что эквивалентное сопротивление плазмы зависит от геометрических параметров источников плазмы, ее параметров и т. д. [4—7]. При наличии магнитного поля азимутальные токи, текущие по антенне, могут индуцировать в плазме не только азимутальные, но и радиальные, и продольные токи [4]. В этом случае представление индуктивного ВЧ-разряда в виде трансформатора становится менее наглядным.

Для нахождения связи между мощностью ВЧ-генератора, потерями в антenne и мощностью P_{pl} , поглощаемой плазмой, при наличии внешнего магнитного поля целесообразно воспользоваться выражением для P_{pl} , полученным в [8]

$$\begin{aligned} P_{pl} = \frac{L\omega}{4} \int_0^R r dr \left\{ \epsilon''_{\perp} |E_r|^2 + \epsilon''_{\perp} |E_{\phi}|^2 + \right. \\ \left. + ig'' (E_{\phi} E_r^* - E_r E_{\phi}^*) + \epsilon''_{\parallel} |E_z|^2 \right\}, \end{aligned} \quad (2)$$

где L — длина источника плазмы;
 ω — частота;
 E_r, E_{ϕ}, E_z — радиальная, азимутальная и продольная компоненты ВЧ-полей, соответственно, генерируемых в плазме, соответственно;
 $\epsilon''_{\parallel}, \epsilon''_{\perp}, g''$ — компоненты тензора диэлектрической проницаемости плазмы.

Выражение (2) можно переписать в виде [4]

$$P_{pl} = R_{pl} I^2,$$

где I — ток, текущий через антенну;

R_{pl} — множитель, имеющий размерность сопротивления и в работе [4] названный эквивалентным активным сопротивлением плазмы.

Как и следовало ожидать, при чисто индуктивном возбуждении ВЧ-разряда независимо от наличия внешнего магнитного поля мощность, поглощаемая плазмой, пропорциональна квадрату тока, текущего через антенну. Это дает основание использовать эквивалентную схему, изображенную на рис. 1, а также выражение (1) для анализа баланса мощности во внешней цепи ВЧ-генератора и при наличии внешнего магнитного поля.

Таким образом, при условии, что нагрузка согласована с генератором, ВЧ-мощность, отдаваемая генератором во внешнюю цепь P_{Gen} , распределяется между двумя каналами: часть мощности идет на нагрев антenne, а часть ее поглощается плазмой.

В теоретических работах [4—7] показано, что значения R_{pl} зависят от параметров плазмы, геометрических размеров источников плазмы, величины внешнего магнитного поля, давления нейтрального газа и т. д. При этом очевидно, что доля мощности, поглощаемая плазмой, зависит от параметров самой плазмы. Цель настоящей работы — исследование эффектов, возникающих в результате "самосогласованного" поглощения ВЧ-мощности плазмой. Для реализации поставленной задачи были измерены параметры плазмы и соответствующие им значения эквивалентного сопротивления.

Методика эксперимента

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 2.



Рис. 2. Схема экспериментальной установки

Источник плазмы представлял собой цилиндрическую стеклянную газоразрядную камеру (ГРК) диаметром 15 см и длиной 10 см, расположенную между двумя диэлектрическими фланцами, внутренняя поверхность которых была закрыта стеклом (рис. 3). Откачка источников производилась через нижний фланец, в котором выполнены специальные отверстия. На нижнем фланце смонтирован также газоввод, через который в разряд подается рабочий газ с заданным расходом. На верхней поверхности источника плазмы крепится спиральная антенна, состоящая из трех витков. Антenna выполнена из медной трубы диаметром 3 мм и охлаждается водой. Магнитное поле в источниках плазмы создавалось с помощью магнитных систем, основанных на электромагнитах. Использовались также соленоиды, позволяющие изменять индукцию осевого магнитного поля внутри источника плазмы в диапазоне 0–30 мТл с неоднородностью порядка 30 %.

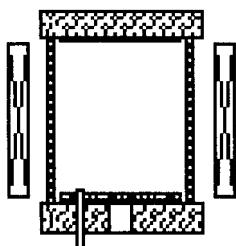


Рис. 3. Схема источника плазмы

Для возбуждения и поддержания разряда в источниках плазмы спиральная антенна через согласующее устройство подсоединялась к ВЧ-генератору. Основной объем работы выполнен с помощью ВЧ-генераторов ГТВЭ-1000, работающих на частоте 13,56 МГц и позволяющих плавно регулировать мощность в диапазоне 0–1000 Вт. Мощность, отдаваемая генератором во внешнюю цепь P_{Gen} , определялась как разница между падающей P_F и отраженной P_R мощностями, измеряемыми с помощью измерителя мощности CN-101L, включенного в 50-омную линию между ВЧ-генератором и системой согласования. В процессе экспериментов отраженная мощность составляла 1–10 % от падающей.

Для определения доли мощности, поглощенной плазмой, и эквивалентного сопротивления плазмы в точке А (см. рис. 2) был встроен датчик ВЧ-тока, сигнал с которого поступал на вход двухлучевого осциллографа С1-122А или на вход ВЧ-платы АЦП. Основанием для измерения эквивалентного сопротивления плазмы в настоящей работе явилась формула (1), связывающая мощность ВЧ-генератора, отдаваемую во внешнюю цепь, с током, текущим через антенну, сопротивлением антенны и эквивалент-

ным сопротивлением плазмы. Отметим, что в реальных экспериментах сопротивление антенны включает в себя потери на нагрев элементов системы согласования, антены, металлических частей установки, расположенных вблизи источника плазмы вследствие возбуждения в них индукционных токов, ВЧ-разъемов и т. д.

В связи с этим измерения и обработка результатов экспериментов проводились по следующей схеме:

1. Сначала определялось эффективное сопротивление антенны по формуле

$$R_{ant} = P_{Gen} / I^2, \quad (3)$$

где P_{Gen} — мощность ВЧ-генератора, отдаваемая во внешнюю цепь;

I_0 — ток через антенну без разряда.

2. Измерялась зависимость тока через антенну от мощности ВЧ-генератора с разрядом при различных фиксированных значениях внешнего магнитного поля. Полученные данные использовались для расчета сопротивления внешней цепи, включающей в себя эквивалентное сопротивление антенны и эквивалентное сопротивление плазмы, по формуле

$$R_{ant} + R_{pl} = P_{Gen} / I^2.$$

3. Из значений сопротивления нагрузки вычитались значения сопротивления антенны

$$R_{pl} = P_{Gen} / I^2 - R_{ant}. \quad (4)$$

Таким образом определялось эквивалентное сопротивление плазмы.

4. По эквивалентному сопротивлению плазмы вычислялись доля ВЧ-мощности, поглощаемая плазмой P_{pl}

$$P_{pl} = R_{pl} I^2, \quad (5)$$

и эффективность ξ вложения мощности в плазму

$$\xi = P_{pl} / P_{Gen}.$$

Для контроля параметров плазмы проводилось ее зондирование с помощью системы зондов Ленгмюра. Три зонда были установлены в центральном сечении источника плазмы на расстоянии 0, 2 и 6 см от оси источника. При проведении измерений использовались фильтры, подавляющие первую и вторую гармоники в цепи зонда. Энергетическое распределение $f(\varepsilon)$ определялось на основании зондовых характеристик с помощью численного дифференцирования [9]. Эффективная температура электронов T_{eff} определялась по известным $f(\varepsilon)$ по формуле

$$T_{eff} = 2/3 \int \varepsilon f(\varepsilon) \sqrt{\varepsilon} d\varepsilon.$$

Одновременно с зондовыми измерениями контролировалась интенсивность свечения плазмы (см. рис. 2). Излучение источника плазмы с помощью световода попадало на входную щель монохроматора МДР-23, на выходе которого был установлен фотоэлектронный умножитель ФЭУ-100. Сигнал с выхода последнего попадал на усилитель и регистрировался с помощью платы АЦП, встроенной в компьютер. Сканирование спектра осуществлялось в диапазоне 3500—7500 Å. Отношение интенсивностей линий при 4200 Å использовалось для нахождения эффективной температуры быстрых электронов.

Результаты экспериментов

На рис. 4 представлена радиальная зависимость концентрации электронов, измеренная в центральном сечении источника плазмы, при различных значениях магнитного поля при фиксированной мощности ВЧ-генератора. Как видно, увеличение магнитного поля сопровождается изменением плотности плазмы и ее перераспределением по сечению источника плазмы. В дальнейшем на основании измерений плотности плазмы $n_e(r)$ на различных расстояниях от оси источника вычислялось среднее значение плотности плазмы N_e по формуле

$$N_e = \int n_e(r) r dr .$$

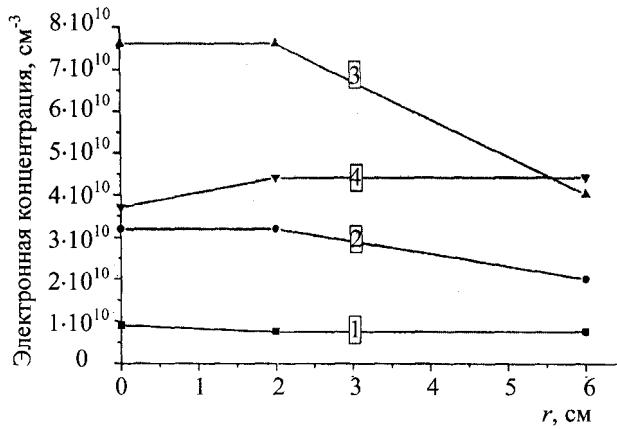


Рис. 4. Радиальное распределение плотности плазмы при магнитных полях:
1 – 0 мТл; 2 – 0,5 мТл; 3 – 1,1 мТл; 4 – 1,4 мТл;
 $P_{Gen} = 150$ Вт; давление аргона – 3 мTorr

На рис. 5 показано изменение усредненной плотности плазмы от величины магнитного поля, измеренные при различных фиксированных мощностях ВЧ-генератора. Видно, что сначала с увеличением магнитного поля B происходит резкий рост концентрации электронов, затем

при достижении некоторого критического магнитного поля B_c концентрация электронов уменьшается, а затем происходит срыв разряда. Увеличение мощности ВЧ-генератора сопровождается смещением B_c в область больших магнитных полей. Такое же смещение наблюдается и при повышении давления аргона (рис. 6).

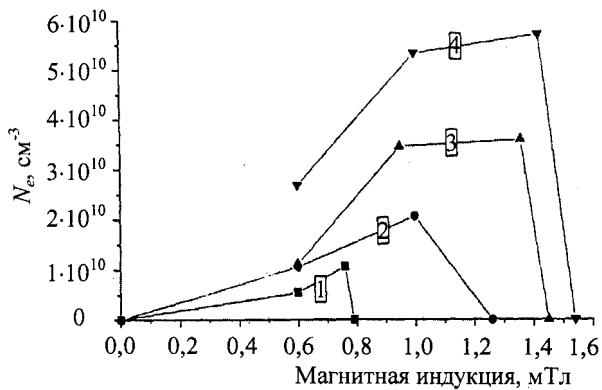


Рис. 5. Зависимости средней плотности плазмы от магнитного поля, измеренные при мощности ВЧ-генератора:
1 – 100 Вт; 2 – 150 Вт; 3 – 200 Вт; 4 – 300 Вт;
давление аргона – 1,6 мTorr

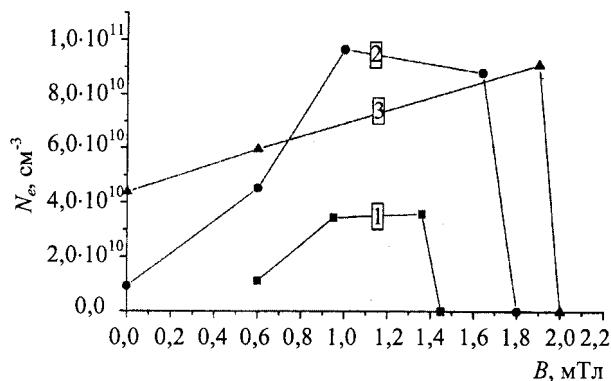


Рис. 6. Зависимости средней плотности плазмы от магнитного поля, измеренные при мощности ВЧ-генератора 200 Вт и давлениях аргона:
1 – 1,6 мTorr; 2 – 3 мTorr; 3 – 5 мTorr

На рис. 7 показана динамика эффективной температуры электронов при изменении магнитного поля, измеренная при различных мощностях ВЧ-генератора и давлениях аргона. Как видно, в пределах погрешности эксперимента температура электронов остается неизменной, хотя обращает на себя внимание небольшое увеличение температуры электронов при магнитных полях, соответствующих ЭЦР, и магнитных полях, предшествующих срыву разряда. Аналогичный вывод был сделан на основании измерений температуры электронов по интенсивностям спектральных линий. Увеличение эффективной температуры электронов при условиях ЭЦР зафиксировано также в работе [10].

Как видно из рис. 5 и 6, изменение магнитного поля сопровождается существенным нелинейным изменением концентрации плазмы. Чтобы разобраться в причинах наблюдавшегося эффекта, рассмотрим баланс мощности во внешней цепи ВЧ-генератора.

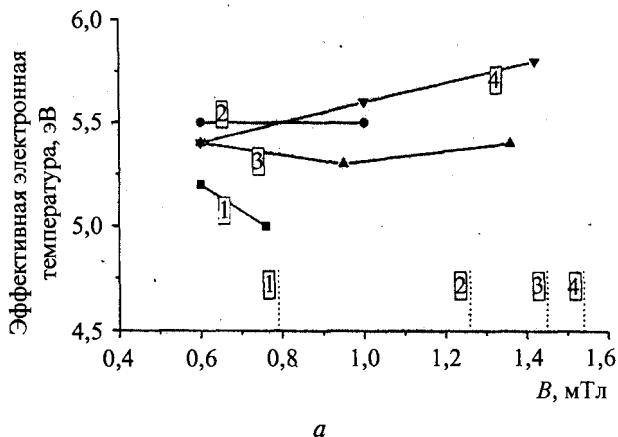
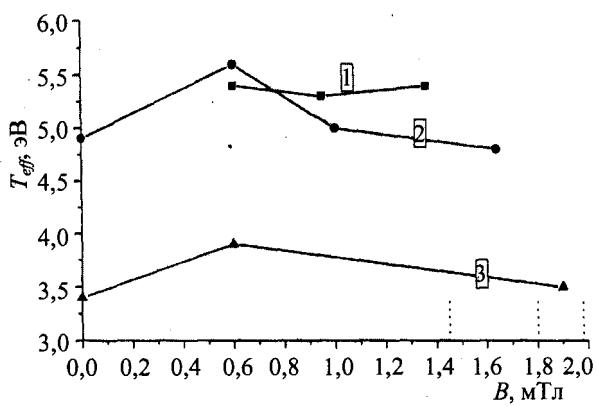
*a**б*

Рис. 7. Зависимости эффективной температуры электронов от магнитного поля, измеренные при мощности ВЧ-генератора:

а — 1 — 100 Вт; 2 — 150 Вт; 3 — 200 Вт; 4 — 300 Вт;
давление аргона: 1,6 мТорр; **б** — при 200 Вт и давлениях
аргона: 1 — 1,6 мТорр; 2 — 3 мТорр; 3 — 5 мТорр

На рис. 8 показана типичная зависимость квадрата тока через антенну от мощности ВЧ-генератора, измеренная без разряда. Как видно, зависимость I_0^2 от P_{Gen} при отсутствии отраженной мощности является линейной в пределах 3 %. Наличие отраженной мощности приводит к уширению коридора ошибки до 10 % в области, где отраженная мощность составляет более 20 % от падающей. Линейное изменение квадрата тока через антенну от вкладываемой ВЧ-мощности дает основание использовать выражение (3) для нахождения эффективного сопротивления антенны. В настоящей работе для усиления эффектов влияния внешней цепи на параметры плазмы была использована антenna с эффективным сопротивлением $R_{ant} = 3,6$ Ом.

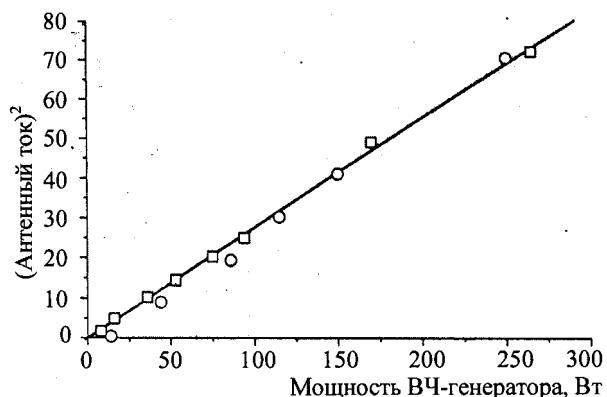


Рис. 8. Зависимость тока через антенну без разряда от мощности ВЧ-генератора (разница между падающей и отраженной мощностями):

□ — при отсутствии отраженной мощности;
○ — при наличии 30 Вт отраженной мощности

На рис. 9 показана динамика изменения тока через антенну при изменении величины внешнего магнитного поля и мощности ВЧ-генератора. Измерения показали, что поджиг разряда приводит к небольшому уменьшению тока, текущего через антенну, а дальнейшее увеличение магнитного поля — к росту разницы между токами, текущими через антенну при наличии разряда и без него, что свидетельствует о росте эквивалентного сопротивления плазмы и, соответственно, доли мощности, поглощенной плазмой. Увеличение магнитного поля выше некоторого критического значения B_{cr} приводит к возрастанию тока через антенну. После срыва разряда ток через антенну возвращается к значениям, имевшим место до поджига разряда.

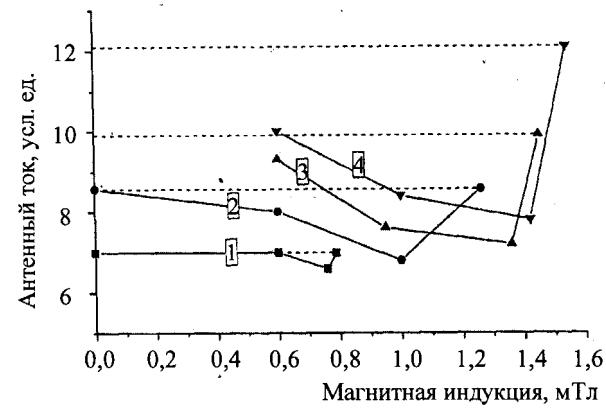


Рис. 9. Зависимости тока через антенну от магнитного поля, измеренные при мощности ВЧ-генератора:

1 — 100 Вт; 2 — 150 Вт; 3 — 200 Вт; 4 — 300 Вт; давление аргона — 1,6 мТорр. Пунктиром отмечен ток, проходящий через антенну при отсутствии разряда

Значения тока, проходящего через антенну, были использованы для расчета эквивалентного сопротивления плазмы и величины ВЧ-мощности P_{pl} , поглощенной плазмой по формулам (4) и (5). На рис. 10 собраны все экспериментальные

данные, представленные в виде зависимости $n_e / (P_{pl} \cdot p)$ от мощности, поглощенной плазмой. Здесь p — давление аргона в разрядной камере. Можно видеть, что при условии, когда в плазму вкладывается мощность, превышающая 40 Вт, все точки в пределах погрешности эксперимента ложатся на прямую, параллельную оси абсцисс. Это означает, что концентрация электронов в плазме индуктивного ВЧ-разряда пропорциональна вложенной в плазму мощности, а все особенности изменения плотности плазмы с изменением магнитного поля связаны с перераспределением мощности ВЧ-генератора между активным эффективным сопротивлением антенны и плазмы. Рост отношения $n_e / (P_{pl} \cdot p)$ в области малых (<40 Вт) мощностей, вложенных в плазму, по-видимому, связан с наличием емкостной компоненты разряда.

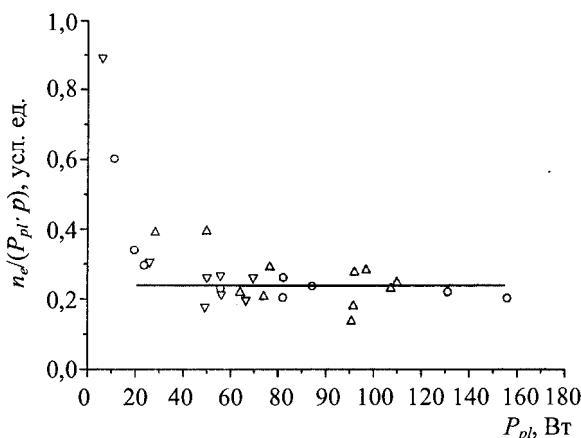


Рис. 10. Зависимость $n_e / (P_{pl} \cdot p)$ от мощности, поглощенной плазмой

В заключение рассмотрим зависимость эквивалентного сопротивления плазмы от величины магнитного поля, измеренной при фиксированной мощности ВЧ-генератора. Подчеркнем, что именно динамика поведения эквивалентного сопротивления определяет наблюдавшиеся особенности разряда при изменении магнитного поля. Как видно из рис. 11, при всех рассмотренных давлениях аргона увеличение магнитного поля вплоть до B_{cr} сопровождается ростом эквивалентного сопротивления, затем наблюдается резкое падение R_{pl} . При наименьшем из рассмотренных давлений значения эквивалентного сопротивления при магнитных полях, соответствующих условиям возбуждения геликонов и волн Трайвелписа-Голда, существенно превосходят значения R_{pl} , измеренные без магнитного поля. По мере роста давления аргона эквивалентное сопротивление плазмы индуктивного ВЧ-разряда без магнитного поля возрастает, а R_{pl} , измеренные при наличии внешнего магнитного поля, несколько убывают. Это при-

водит к выравниванию эффективности вложения ВЧ-мощности в плазму без магнитного поля и при его наличии с увеличением давления.

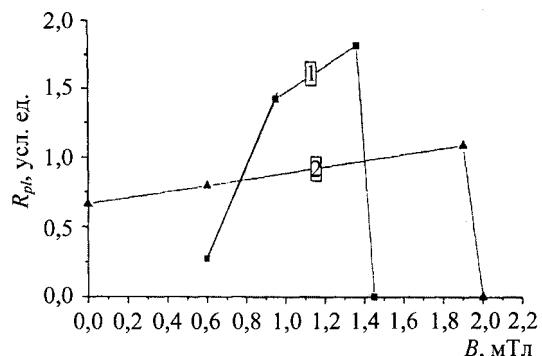


Рис. 11. Зависимости эквивалентного сопротивления плазмы от магнитного поля, измеренные при мощности ВЧ-генератора 200 Вт и давлениях аргона:
1 — 1,6 мТорр; 2 — 5 мТорр

Выводы

1. При фиксированной мощности ВЧ-генератора, отдаваемой во внешнюю цепь, наблюдается нелинейное изменение концентрации плазмы индуктивного ВЧ-разряда при изменении индукции внешнего магнитного поля. При магнитных полях, превышающих критическое значение, наблюдаются срывы разряда.

2. Эффективная температура электронов слабо зависит от индукции внешнего магнитного поля. Наблюдаются слабое увеличение эффективной температуры при магнитных полях, соответствующих условиям ЭЦР, и магнитных полях, предшествующих срыву разряда.

3. Плотность плазмы индуктивного разряда пропорциональна доле ВЧ-мощности, поглощенной плазмой.

4. Особенности поведения индуктивного ВЧ-разряда объясняются перераспределением ВЧ-мощности между активным эффективным сопротивлением антенны и плазмой, которое в свою очередь определяется эквивалентным сопротивлением плазмы.

Литература

1. Godyak V. A., Piejak R. B., Alexandrovich B. M.// Plasma Sources Sci. Technol. 2002. № 11. P. 525—543.
2. Александров А. Ф., Бугров Г. Э., Вавилин К. В., Керимова И. Ф., Кралькина Е. А., Павлов В. Б., Плаксин В. Ю., Рухадзе А. А. Краткие сообщения по физике (в печати).
3. Piejak R. B., Godyak V. A., Alexandrovich B. M.// Plasma Sources Sci. Technol. 1992. № 1. P. 179—186.
4. Александров А. Ф., Бугров Г. Э., Вавилин К. В., Керимова И. Ф., Кондранин С. Г., Кралькина Е. А., Павлов В. Б., Плаксин В. Ю., Рухадзе А. А.// Физика плазмы. 2004. Т. 30. № 5.
5. Вавилин К. В., Плаксин В. Ю., Ри М. Х., Рухадзе А. А.// ЖТФ. 2004. Т. 74. № 5. С. 44—49.
6. Вавилин К. В., Плаксин В. Ю., Ри М. Х., Рухадзе А. А.// Там же. № 6.

7. Вавилин К. В., Плаксин В. Ю., Ру М. Х., Рухадзе А. А.// Физика плазмы. 2004. № 8. 30.
8. Гинзбург В. Л., Рухадзе А. А. Волны в магнитоактивной плазме. — М.: Наука, 1975: Перевод с англ. яз. Springer Verlag, Electrophys. Hand. der Phys., 1972. V. 49.
9. Antonova T., Bougrov G., Bougrova A. et al.// Jpn. J. Appl. Phys. 1998. V. 37. P. 6906—6915.
10. Chin Wook Chung, Kim S. S., Chang H. Y.// Phys. Rev. Letters, 2002. № 9. P. 88.

Статья поступила в редакцию 30 марта 2005 г.

Examination of an inductive high-frequency discharge as the self-consistent system.

Part II. Examination of plasma parameters and an efficiency of high-frequency power uptake by the plasma of an inductive high-frequency discharge of low pressure

*A. F. Aleksandrov, G. E. Bugrov, K. V. Vavilin, I. F. Kerimova, E. A. Kralkina,
V. B. Pavlov, V. Yu. Plaksin*
Physical Faculty of the Moscow State University, Moscow, Russia

A. A. Rukhadze
General Physics Institute, Moscow, Russia

In the present series of works consideration is made to features of behaviour of a high-frequency discharge with a magnetic field and without one. Consideration is made with an unified position, which views the discharge as a self-consistent system, in which a share of power of a high-frequency generator, immersed by plasma, is determined with parameters of the plasma. The second work of the cycle shows the results of collateral experimental examination of plasma parameters and efficiency of high-frequency power uptake by the argon plasma of low pressure (1.6—5 mTorr) without a magnetic field, and also at magnetic fields relevant to requirements of the electron cyclotron resonance and requirements of helicons and Triwelpice-Gold waves exitation.

* * *