

Статья поступила в редакцию 6 октября 2005 г.

The reaction of plasma on the potential probe with negative electric charge

V. A. Fedorov

Mints Radio Engineering Institute Joint Stock Company, Moscow, Russia

The reaction of plasma on the potential probe with negative electric charge is determined. Analytical self-consistent solutions to the system of plasma hydrodynamic equations are obtained. The solutions satisfy nonstationary absorbing boundary conditions imposed on the potential probe surface. The electric-field intensity and the ion velocity, concentration, and current density that depend on the initial position of a particle and distance are found. The dynamics of the ions in the vicinity of the potential probe has been investigated.

УДК 533.9

Исследование индуктивного ВЧ-разряда как самосогласованной системы

Часть IV.* Результаты исследования эквивалентного сопротивления индуктивного ВЧ-разряда низкого давления без магнитного поля

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

В четвертой части серии работ на основании измерений эквивалентного сопротивления экспериментально изучена эффективность ввода ВЧ-мощности в индуктивный ВЧ-разряд низкого давления без магнитного поля. Кроме того, проведено сравнение результатов экспериментов с результатами численных расчетов, основанных на теоретических расчетах, полученных ранее.

Части I, II и III опубликованы в журнале "Прикладная физика" № 4, 5, 2005 г. и № 1, 2006 г., соответственно.

Настоящая серия статей посвящена анализу особенностей поведения индуктивного ВЧ-разряда как самосогласованной системы, в которой мощность ВЧ-генератора распределяется между двумя каналами: элементами внешней цепи, имеющими активное сопротивление, и плазмой, причем доля мощности, поглощаемая плазмой, зависит от параметров самой плазмы. Во второй части цикла [1] представлены результаты совместного экспериментального исследования параметров плазмы и эффективности поглощения ВЧ-мощности плазмой индуктивного ВЧ-разряда в аргоне при давлениях 1,6—5 мТорр без магнитного поля и при магнитных полях, соответствующих условиям ЭЦР и условиям возбуждения в плазме геликонов и волн Трайвелписа-Голда. Показано, что нелинейная зависи-

мость плотности плазмы от величины магнитного поля является следствием нелинейного поглощения ВЧ-мощности плазмой. В работе [1] и ранее в работах [2—6] показано, что характеристикой способности плазмы поглощать ВЧ-мощность является эквивалентное сопротивление плазмы R_{pl} , которое зависит как от параметров плазмы, так и от геометрических размеров источника плазмы, величины внешнего магнитного поля, типа индуктора. Более того [2—6], закономерности изменения эквивалентного сопротивления с изменением условий эксперимента несут в себе информацию об основных физических механизмах поглощения ВЧ-мощности плазмой. Однако в настоящее время в литературе практически отсутствуют данные по систематическому исследованию эквивалентного сопротивления.

В настоящей работе на основании измерений эквивалентного сопротивления экспериментально изучена эффективность ввода ВЧ-мощности в индуктивный ВЧ-

разряд низкого давления без магнитного поля. Кроме того, проведено сравнение результатов экспериментов с результатами численных расчетов, основанных на теоретических результатах, полученных в работах [2—6].

Схема экспериментальной установки и методика измерений

Экспериментальная установка, использованная в настоящей работе, подробно описана в работах [1, 7]. В настоящей работе, так же как и в работе [1], использовались источники плазмы, представляющие собой цилиндрическую стеклянную газоразрядную камеру (ГРК), расположенную между двумя диэлектрическими фланцами, внутренняя поверхность которых была закрыта стеклом (рис. 1). Использовались камеры с внутренним диаметром 15 и 22 см, длиной 10, 15, 20 и 25 см, толщина стенок стеклянных цилиндров равнялась 3 мм. Откачка источников производилась через нижний фланец, в котором были выполнены специальные отверстия.

На нижнем фланце был также смонтирован газоввод, через который в разряд подавался рабочий газ с заданным расходом.

Для возбуждения и поддержания разряда в источниках плазмы использовались спиральные антенны, расположенные на внешней торцевой или боковой поверхности (рис. 2). Антенны были выполнены из медной трубки диаметром 3 мм и охлаждались потоком воды. Длина диэлектрических трубок, подводящих воду, составляла не менее 5 м, что обеспечивало наличие сопротивления между антенной, внутри которой протекала вода, и землей не менее 1 МОм.

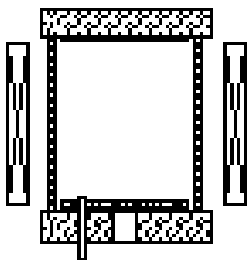


Рис. 1. Схема источника плазмы

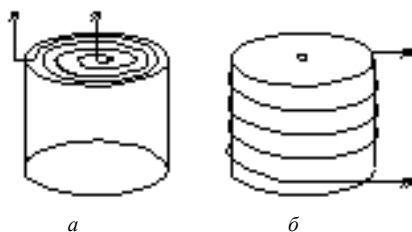


Рис. 2. Схемы использованных антенн, расположенных на поверхностях:
а — внешней торцевой; б — боковой

Для возбуждения и поддержания разряда в источниках плазмы спиральная антенна через согласующее устройство подсоединялась к ВЧ-генератору (рис. 3). Основной объем работы был выполнен с помощью ВЧ-генераторов ГТВЭ-1000, работающих на частоте 13,56

МГц и позволяющих плавно регулировать мощность в диапазоне от 0 до 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.

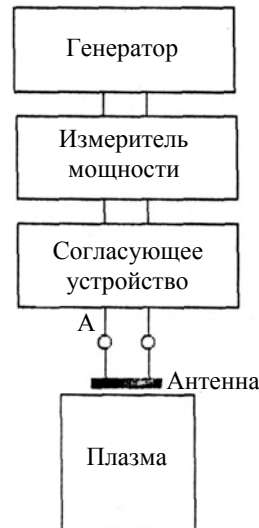


Рис. 3. Схема экспериментальной установки

Для определения доли мощности, поглощенной плазмой, и эквивалентного сопротивления плазмы в точке А (см. рис. 3) был встроен датчик ВЧ-тока, сигнал с которого поступал на вход двухлучевого осциллографа С1-122А или вход ВЧ-платы АЦП. Основанием для измерения эквивалентного сопротивления плазмы в настоящей работе явилась формула [1]

$$P_{Gen} = I^2 (R_{Ant} + R_{Pl}),$$

связывающая мощность ВЧ-генератора P_{Gen} , отдаваемую во внешнюю цепь, с током I , текущим через антенну, сопротивлением антенны R_{Ant} и эквивалентным сопротивлением плазмы R_{Pl} .

Отметим, что в реальных экспериментах сопротивление антенны включает в себя потери на нагрев элементов системы согласования, антенны, 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.

- Сначала определялось эффективное сопротивление антенны по формуле

$$R_{Ant} = P_{Gen} / I_0^2,$$

где I_0 — ток через антенну без разряда.

- 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, включающего в себя эквивалентное сопротивление

ние антенны и эквивалентное сопротивление плазмы, по формуле

$$R_{Ant} + R_{Pl} = P_{Gen} / I^2.$$

- Из значений сопротивления нагрузки вычитались значения сопротивления антенны

$$R_{Pl} = P_{Gen} / I^2 - R_{Ant}. \quad (1)$$

Таким образом определялось эквивалентное сопротивление плазмы.

- По эквивалентному сопротивлению плазмы вычислялась доля ВЧ-мощности, поглощаемая плазмой R_{Pl}

$$P_{Pl} = R_{Pl} I^2.$$

На рис. 4 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 (1) для нахождения эффективного сопротивления антенны. В зависимости от постановки эксперимента R_{Ant} изменялось от 0,9 до 3,6 Ом.

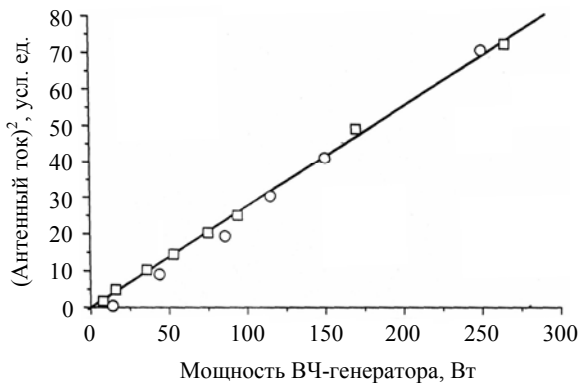


Рис. 4. Зависимость тока через антенну без разряда от мощности ВЧ-генератора (разницы между падающей и отраженной мощностью) при условии, что отраженная мощность не превышала 1 % от падающей (□) и при условии, что отраженная мощность составляла 30 Вт (○)

Как показали результаты, представленные в [1], поджиг разряда приводит к небольшому уменьшению тока, текущего через антенну, а дальнейшее увеличение ВЧ-мощности — 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. В работах [1, 8] показано, что увеличение мощности ВЧ-генератора приводит к скачкообразному уменьшению тока, текущего через антенну. В литературе [9] описанное явление отождествляется с переходом разряда из емкостной в индуктивную моду. Наличие емкостной связи между антенной и плазмой является одним из возможных источников систематической погрешности в определении тока, текущего через антенну, а следовательно, и эквивалентного сопротивления плазмы. Результаты, представленные в [8], позволили сделать вывод о том, что при условиях настоящих экспериментов в режиме с высокой интенсивностью свечения плазмы емкостная связь антенны уменьшает ток, текущий через антенну не более чем на 10 %, при этом абсолютные значения эквивалентного сопротивления плазмы могут быть завышены на 20 %. Еще одним источником погрешности определения эквивалентного сопротивления плазмы является погрешность в определении ВЧ-мощности, которая составляет величину порядка 10 %. Оценивая погрешность измерения относительных и абсолютных значений тока через антенну в 3 и 5 %, соответственно, относительная и абсолютная погрешности в измерении эквивалентного сопротивления оказываются равными 20 и 50 %.

Результаты экспериментов

На рис. 5, а показана зависимость эквивалентного сопротивления плазмы от величин ВЧ-мощности, поглощенной плазмой, для случая индуктивного разряда без магнитного поля, возбуждаемого спиральными антеннами, расположенными на верхней и боковой поверхности плазменных цилиндров радиусом 7,5 и 11 см при давлении 2 мТорр. Напомним, что, как показано в работе [1], концентрация плазмы изменяется пропорционально величине мощности, поглощенной плазмой. Как видно из рис. 5, в области малых P_{Pl} эквивалентное сопротивление плазмы растет примерно пропорционально вложенной мощности, затем зависимость $R_{Pl}(P_{Pl})$ насыщается.

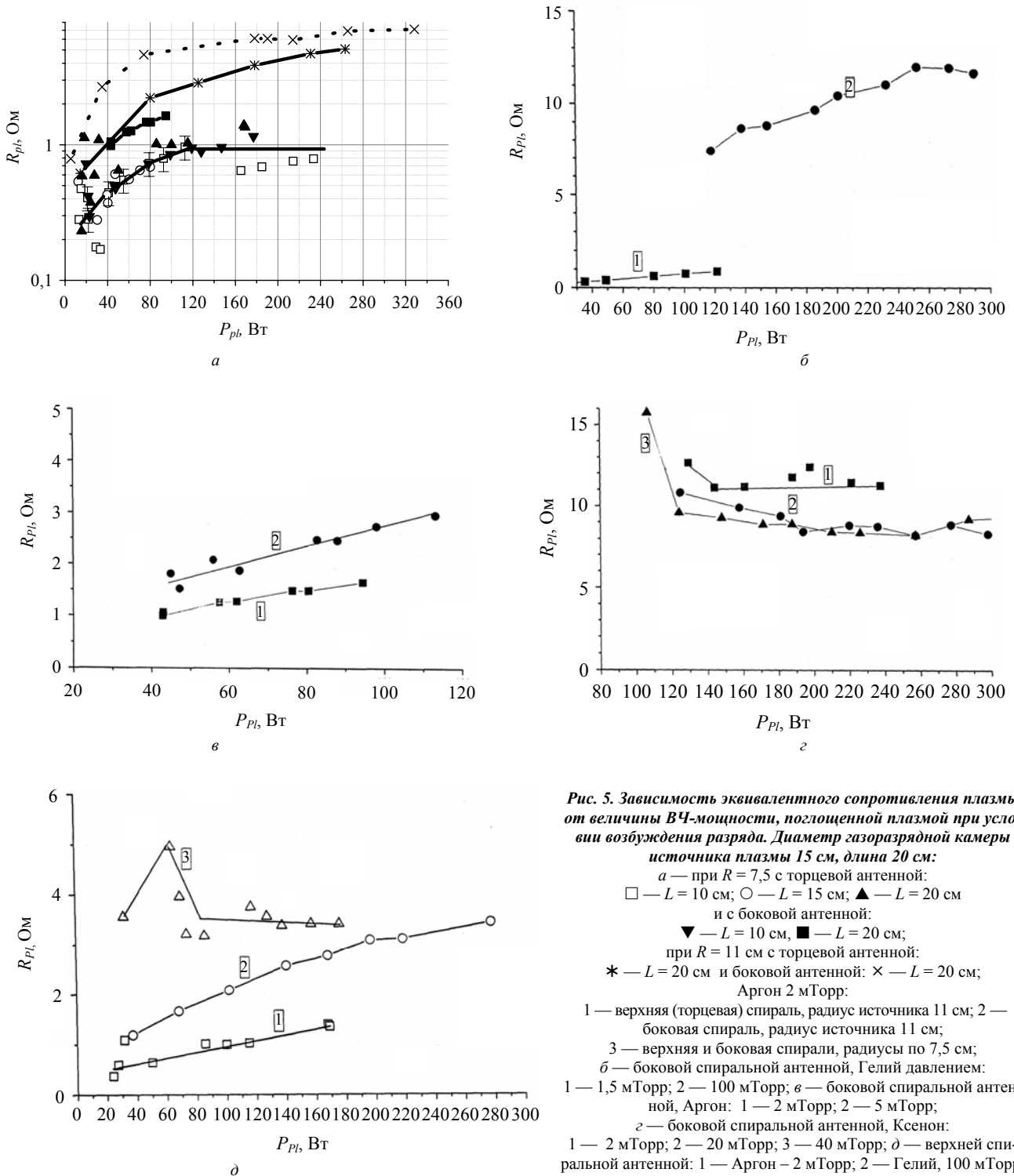


Рис. 5. Зависимость эквивалентного сопротивления плазмы от величины ВЧ-мощности, поглощенной плазмой при условии возбуждения разряда. Диаметр газоразрядной камеры источника плазмы 15 см, длина 20 см:
 а — при $R = 7,5$ с торцевой антенной:
 □ — $L = 10$ см; ○ — $L = 15$ см; ▲ — $L = 20$ см
 и с боковой антенной:
 ▼ — $L = 10$ см, ■ — $L = 20$ см;
 при $R = 11$ см с торцевой антенной:
 * — $L = 20$ см и боковой антенной; × — $L = 20$ см;
 Аргон 2 мТорр:
 1 — верхняя (торцевая) спираль, радиус источника 11 см; 2 — боковая спираль, радиус источника 11 см;
 3 — верхняя и боковая спирали, радиусы по 7,5 см;
 б — боковой спиральной антенной, Гелий давлением:
 1 — 1,5 мТорр; 2 — 100 мТорр; в — боковой спиральной антенной, Аргон: 1 — 2 мТорр; 2 — 5 мТорр;
 г — боковой спиральной антенной, Ксенон:
 1 — 2 мТорр; 2 — 20 мТорр; 3 — 40 мТорр; д — верхней спиральной антенной: 1 — Аргон – 2 мТорр; 2 — Гелий, 100 мТорр; 3 — Ксенон, 20 мТорр

Из рис. 5, а видно, что эквивалентные сопротивления разряда, возбуждаемого верхней и боковой спиралью в источниках радиуса 7,5 см, длины 10 и 15 см, близки друг к другу и составляют величину порядка 1 Ом. Увеличение длины источника плазмы приводит к увеличению эквивалентного сопротивления разряда в случае его возбуждения боковой спиралью в отличие от разряда, возбуждаемого верхней спиралью, эквивалентное сопротивление которого фактически не зависит от длины источника плазмы в диапазоне 10—20 см. Увеличение радиуса источника плазмы до 11 см при длине источника 20 см приводит к существенному уве-

личению эквивалентного сопротивления, причем, как и в случае источника радиуса 7,5 см, значения R_{pl} , полученные с боковой спиральной антенной, выше.

На рис. 5, б—д показана динамика изменения эквивалентного сопротивления плазмы при увеличении давления и изменения рода рабочего газа. Из рисунков видно, что в целом независимо от рода газа увеличение давления газа приводит к увеличению R_{pl} . Этот эффект многократно отмечался как в теоретических [6], так и в экспериментальных работах [10, 11]. Вместе с тем необходимо отметить, что в случае ксенона (см. рис. 5, г и д) зависимость эквивалентного сопро-

тивления от вложенной в разряд мощности является немонотонной у боковой и у верхней спирали.

Чтобы разобраться в физических причинах наблюдавшихся закономерностей целесообразно сравнить экспериментальные данные со значениями эквивалентного сопротивления, рассчитанными на основании формул, полученных в теоретических работах [3, 6]. Результаты расчета эквивалентного сопротивления аргоновой

плазмы (давление 2 мТорр, рабочая частота 13,56 МГц), выполненного для плоских дискообразных источников радиуса 2,5—25 см по формулам, полученным в работах [9, 11], представлены на рис. 6, а.

Как видно, расчетные значения эквивалентного сопротивления по абсолютной величине несколько меньше измеренных. В области малых плотностей плазмы n_e расчетные значения R_{pl} , так же как и экспериментальные, растут пропорционально n_e , затем, как показали расчеты,

проходят через максимум и медленно убывают (как $n_e^{-1/3}$ [6]) в области больших плотностей плазмы. Отметим, что с ростом радиуса источника плазмы значения эквивалентного сопротивления возрастают, а положение максимума функции $R_{pl}(n_e)$ смещается в область меньших концентраций электронов. Немонотонная зависимость эквивалентного сопротивления от плотности плазмы объясняется конкуренцией двух факторов: с одной стороны, поглощение ВЧ-мощности растет с ростом концентрации электронов, с другой — глубина скин-слоя, определяющая ширину области поглощения ВЧ-мощности, убывает с ростом n_e . Неудивительно, что в источниках плазмы большего радиуса максимум функции лежит в области меньших плотностей плазмы.

Рассмотрим зависимость эквивалентного сопротивления от давления газа. Результаты расчетов показаны на рис. 6, б.

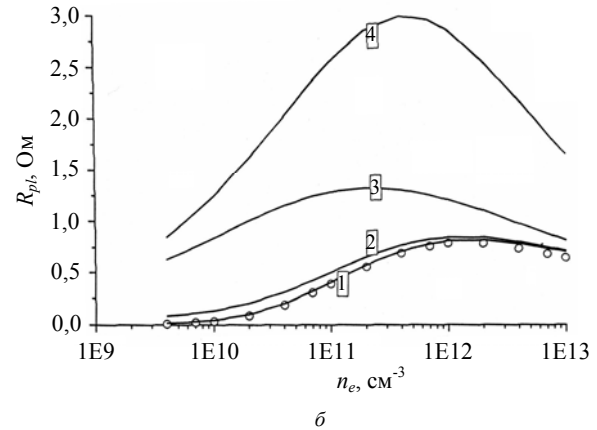
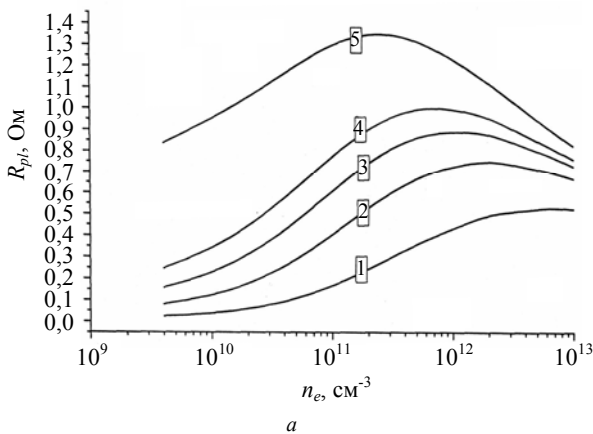


Рис. 6. Зависимость эквивалентного сопротивления плазмы от плотности плазмы. Расчет выполнен для плоских дискообразных источников радиуса:

- а — 1 — 2,5; 2 — 5; 3 — 7,5; 4 — 10; 5 — 25 см по формулам, полученным в [3, 6]. Давление нейтрального газа — 2 мТорр;
- б — 1 — 0,1 мТорр; 2 — 1 мТорр; 3 — 10 мТорр; 4 — 100 мТорр. ○ — R_{pl} , рассчитанное без учета столкновений

Как видно, увеличение давления приводит к существенному повышению эквивалентного сопротивления. Этот эффект многократно отмечался как в теоретических, так и в экспериментальных работах [3, 6, 10, 11]. На рис. 6, б для сравнения приведена зависимость эквивалентного сопротивления от плотности плазмы, рассчитанная в бесстолкновительном пределе. Как отмечалось в работах [3, 6], для анализа механизмов поглощения ВЧ-мощности целесообразно ввести эффективную частоту ν_{eff} , описывающую поглощение ВЧ-мощности в бесстолкновительной плазме. По порядку величины $\nu_{eff} = kV_{Te}$, где k — волновое число, а V_{Te} — тепловая скорость электронов. Из рис. 6, б видно, что при минимальном из рассмотренных давлений $p = 0,1$ мТорр электрон-атомные столкновения не оказывают влияния на величины эквивалентного сопротивления. Это является следствием неравенства $\nu_{ea} \ll \nu_{eff}$, где ν_{ea} — частота электрон-атомных столкновений. Вклад электрон-атомных столкновений приводит к повышению эквивалентного сопротивления, что проявляется при более высоких давлениях, где $\nu_{ea} \approx \nu_{eff}$. Это отчетливо видно из рис. 6, б. Электрон-ионные столкновения, вклад которых становится существенным при высоких плотностях плазмы, приводят к повышению эквивалентного сопротивления при $n_e > 3 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$.

Как отмечалось выше, немонотонная зависимость эквивалентного сопротивления от плотности плазмы объясняется конкуренцией двух факторов: с одной стороны, поглощение ВЧ-мощности растет с ростом концентрации электронов, с другой — глубина скин-слоя, определяющая ширину области поглощения ВЧ-мощности, убывает с ростом n_e . Расчеты показали, что одновременное увеличение давления приводит к смещению максимума функции $R_{pl}(n_e)$ в область меньших n_e . Экспериментально наличие максимума в зависимости R_{pl} от P_{pl} наблюдалось при исследовании разряда в ксеноне. При проведении расчетов давление рабочего газа использовалось для нахождения частоты столкновений электронов с нейтрами. Частота элек-

трон-атомных столкновений в ксеноне существенно выше, чем в аргоне и тем более в гелии, вследствие большего, чем в других газах, сечения передачи импульса. Кроме того, для ксеноновой плазмы характерны более высокие, чем для других газов, значения плотности электронов при равных вложенных в плазму мощностях.

Литература

1. Александров А. Ф., Бугров Г. Э., Вавилин К. В., Керимова И. Ф., Кралькина Е. А., Павлов В. Б., Плаксин В. Ю., Рухадзе А. А. Исследование индуктивного ВЧ-разряда как самосогласованной системы. Часть II. Исследование параметров плазмы и эффективности поглощения ВЧ-мощности плазмой индуктивного ВЧ-разряда низкого давления// Прикладная физика. 2005. № 5.
2. 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. 30. № 5.
3. Вавилин К. В., Плаксин В. Ю., Ри М. Х., Рухадзе А. А.// ЖТФ, 2004. 74. № 5. С. 44—49.
4. Вавилин К. В., Плаксин В. Ю., Ри М. Х., Рухадзе А. А.// Там же. № 6.
5. Вавилин К. В., Плаксин В. Ю., Ри М. Х., Рухадзе А. А.// Там же.
6. Вавилин К. В., Плаксин В. Ю., Ри М. Х., Рухадзе А. А.// Физика плазмы. 2004. 30. № 8.
7. Александров А. Ф., Бугров Г. Э., Вавилин К. В., Керимова И. Ф., Кралькина Е. А., Павлов В. Б., Плаксин В. Ю., Рухадзе А. А. Исследование индуктивного ВЧ-разряда как самосогласованной системы. Часть I. Особенности, наблюдавшиеся при экспериментальном исследовании индуктивного ВЧ-разряда, помещенного во внешнее магнитное поле// Прикладная физика. 2005. № 4.
8. Александров А. Ф., Бугров Г. Э., Вавилин К. В., Керимова И. Ф., Кралькина Е. А., Павлов В. Б., Плаксин В. Ю., Рухадзе А. А. Исследование индуктивного ВЧ-разряда как самосогласованной системы. Часть III. Исследование влияния емкостной составляющей на параметры плазмы индуктивного ВЧ-разряда низкого давления// Прикладная физика. 2005.
9. Turner M. M., Liberman M. A.// Plasma Sources Sci. Technol. 1999. № 8. P. 313—324.
10. Piejak R. B., Godyak V. A., Alexandrovich B. M.// Plasma Sources Sci. Technol. 1992. № 1. P. 179—186.
11. Godyak V. A., Piejak R. B., Alexandrovich B. M.// Ibid. 1994. № 3. P. 169—176.

Статья поступила в редакцию 30 марта 2005 г.

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

Part IV. Results of examination of an equivalent resistance for the inductive high-frequency discharge at a low pressure and without a magnetic field

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 fourth part of a series of operations it has been studied experimentally the efficiency of input of high-frequency power in the inductive discharge at a low pressure and without a magnetic field by measuring an equivalent resistance. Also it has been made matching the results of experiments with the results of numerical calculations, founded on theoretical investigations obtained earlier.

УДК 620.179.16

Явление очищения электродов барьерного озонатора при турбулентном режиме движения газа в нем

И. М. Курко

Пермский государственный университет, г. Пермь, Россия

В. А. Кузнецов

Магнитогорский государственный университет, г. Магнитогорск, Россия

Показано, что самоочищение разрядных промежутков барьерных электрических озонаторов при турбулентном течении озонируемого газа происходит из-за преобладания гидродинамических сил (отрывающихся посторонние твердые и жидкие частицы от поверхности электродов) над электрическими, притягивающими частицы к электродам. Обоснован вы