

Disturbance of the stability of the electric arc under contact opening in a vacuum gap with a transverse magnetic field

D. F. Alferov, D. V. Evsin, Yu. I. Londer
All-Russian Electrotechnical Institute, Moscow, Russia

The paper studies experimentally the characteristics of the d.c. vacuum arc under the contact opening in axially-symmetric predominantly radial magnetic field. The main peculiarities of dynamics of the plasma glow are investigated in the intercontact gap during stable stage of the arc burning at currents in the range of 50 to 150 A. The possible mechanisms of the disturbance of the stability of the vacuum arc in axially-symmetrical magnetic field are discussed. The authors propose a one-dimensional stationary model describing a stable stage of the arc burning. The calculation results are in a fair agreement with the experimental data.

УДК 533.9

Исследование индуктивного ВЧ-разряда как самосогласованной системы

Часть III. Исследование влияния емкостной составляющей на параметры плазмы 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, В. П. Савинов
Институт общей физики РАН, Москва, Россия

В третьей части серии работ представлены результаты исследования влияния емкостной связи между антенной и плазмой на особенности ввода ВЧ-мощности в плазму и характеристики разряда. Для этого емкостная связь была усилена, а индуктивная связь между антенной и плазмой оставалась неизменной. Рассмотрен разряд без магнитного поля, а также при магнитных полях, соответствующих условиям ЭЦР и условиям возбуждения в плазме геликонов и волн Трайвелписа-Голда.

*Части I и II данной серии статей опубликованы в журналах "Прикладная физика" № 4 и 5, 2005 г., соответственно.

В представленной 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 элементами внешней цепи, обладающими активным сопротивлением, причем доля мощности, поглощаемой плазмой, зависит от параметров самой плазмы.

Первая работа серии [1], стимулировавшая появление всего цикла исследований, содержит описание ряда особенностей поведения разряда, обнаруженных как в экспериментах авторов цикла, так и в работах других авторов. Во второй работе цикла [2] 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,

при магнитных полях, соответствующих условиям ЭЦР, а также условиям возбуждения в плазме геликонов и волн Трайвелписа-Голда. Показано, что нелинейная зависимость плотности плазмы от величины магнитного поля является следствием нелинейного поглощения ВЧ-мощности плазмой. Доля ВЧ-мощности, поглощенной плазмой, определяется эквивалентным сопротивлением плазмы, зависящим от параметров плазмы разряда.

В реальном индуктивном ВЧ-разряде наряду с вложением мощности в плазму за счет возбуждения ВЧ электрических полей током, текущим по антенне, возможен еще один канал вложения мощности. Он возникает благодаря наличию паразитных емкостей между антенной и плазмой. Настоящая, третья работа цикла посвящена экспериментальному изучению роли емкостной составляющей разряда в процессах поддержания ВЧ-разряда, возбуждаемого индуктором или антенной.

Исследование влияния емкостной составляющей разряда на параметры плазмы индуктивного разряда

имеет достаточно большую историю [3, 4]. В настоящее время в литературе [3] принята точка зрения, что индуктивный разряд поджигается и горит при малых ВЧ-мощностях в емкостной моде, существующей за счет разницы межвитковых потенциалов. При достижении некоторой критической мощности ВЧ-разряд переходит в индуктивную моду, характеризующуюся более высокой плотностью плазмы, чем емкостная мода. В ряде случаев при переходе из моды с низкой плотностью плазмы в моду с высокой плотностью наблюдается гистерезис зависимости плотности плазмы от ВЧ-мощности. Наиболее подробно физические процессы, имеющие место при переходе из так называемой Е-моды разряда в Н-моду, анализируются в [3]. В большинстве работ [5] для уменьшения емкостной связи между антенной и плазмой используется металлический экран с прорезями. Однако такой экран одновременно с уменьшением емкостной составляющей приводит к уменьшению индуктивной связи между антенной и плазмой. В данной работе для изучения влияния емкостной связи между антенной и плазмой на особенности ввода ВЧ-мощности в плазму и характеристики разряда, напротив, емкостная связь была усилена, а индуктивная связь между антенной и плазмой оставалась неизменной. Рассмотрен разряд без магнитного поля, а также при магнитных полях, соответствующих условиям ЭЦР и условиям возбуждения в плазме геликонов и волн Трайвеллписа-Голда.

Экспериментальная установка и методика эксперимента

Экспериментальная установка подробно описана в работах [1, 2]. В работе использовались источник ионов, конструкция которого представлена в работе [1], и источник плазмы, представленный в работе [2]. Диаметр газоразрядной камеры (ГРК) источника ионов составлял 5 см, длина 10 см. Газоразрядная камера источника плазмы имела внутренний диаметр 15 см и длину 10 см.

Как и в работах [1, 2], для возбуждения и поддержания разряда в источниках ионов и плазмы использовались спиральные антенны, закрепленные на верхней торцевой поверхности газоразрядных камер. Как отмечалось выше, в настоящее время в большинстве работ [5] для уменьшения емкостной связи между антенной и плазмой используется металлический экран с прорезями. Однако такой экран одновременно с уменьшением емкостной составляющей приводит к уменьшению индуктивной связи между антенной и плазмой. В настоящей работе для изучения влияния емкостной связи между антенной и плазмой на характеристики разряда дополнительно к спирали на боковой внешней поверхности ГРК размещались обкладки конденсатора, выполненные в виде двух колец или секторов (рис. 1). Это позволяло организовать емкостной канал ввода мощности при условии, что индуктивная связь между антенной и плазмой оставалась неизменной.

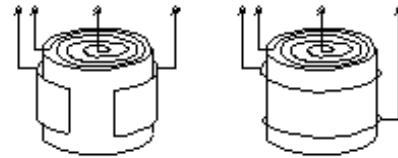


Рис. 1. Схема размещения антенны и конденсатора на поверхности ГРК

Для возбуждения и поддержания чисто индуктивного разряда в источниках ионов и плазмы использовалась та же схема, что и в работах [1, 2], т. е. антенна через систему согласования подключалась к ВЧ-генератору, работающему на частоте 13,56 МГц. Мощность генератора могла плавно изменяться в диапазоне 0—300 Вт. Ток, текущий через антенну, измерялся в точке А (рис. 2) с помощью пояса Роговского. Для изучения роли емкостной составляющей обкладки конденсатора, расположенные на внешней поверхности ГРК, через отдельную систему согласования подключались ко второму ВЧ-генератору, мощность которого можно было изменять независимо от первого. Второй генератор также работал на частоте 13,56 МГц, его мощность можно было плавно изменять в диапазоне 0—200 Вт. Схема подключения показана на рис. 2. В цепь заземленного электрода конденсатора в точке В был включен пояс Роговского, с помощью которого измерялся ток, протекающий в емкостном канале.

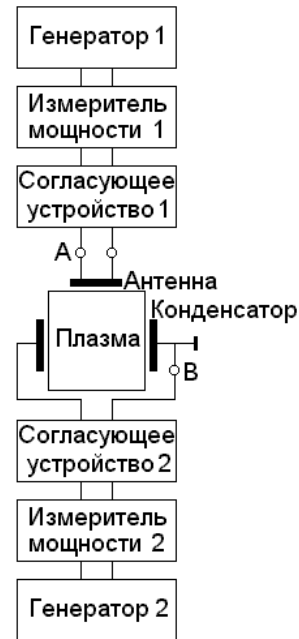


Рис. 2. Схема эксперимента, позволяющая независимо вводить ВЧ-мощность через индуктивный и емкостной каналы

Для моделирования реального индуктивного ВЧ-разряда, обладающего емкостной компонентой (далее гибридного ВЧ-разряда), индуктор и конденсатор, соединенные параллельно, подключались к одному ВЧ-генератору так, как это показано на рис. 3. При этом измерялись токи, текущие через антенну и конденсатор.

Для контроля параметров плазмы проводились зондирование плазмы с помощью системы зондов Ленгмюра и спектральные измерения. Схема измерений описана в [2]. При работе с источником ионов измерялся ток ионов, извлекаемый из источника. Для этого на электроды ионно-оптической системы подавались потенциалы, соответствующие схеме "ускорение—замедление".

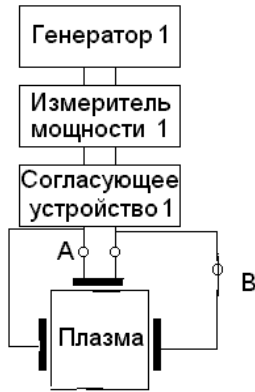


Рис. 3. Схема организации гибридного разряда

Эксперименты были выполнены по следующему плану.

1. При фиксированных условиях эксперимента измерялись зависимость тока I_1 , текущего через антенну, концентрации электронов или интенсивности свечения плазмы Int_1 или ионного тока i_{b1} , извлекаемого из источника ионов, от мощности первого ВЧ-генератора без подключения второго генератора.

2. При тех же условиях эксперимента измерялись зависимость тока I_2 , текущего через антенну, интенсивности свечения плазмы Int_2 или ионного тока i_{b23} , извлекаемого из источника ионов, от мощности ВЧ-генератора при условии, что параллельно с индуктивным каналом в плазму дополнительно вкладывалась мощность через емкостной канал от второго ВЧ-генератора (схему эксперимента см. на рис. 2).

3. При тех же условиях эксперимента измерялись зависимость тока I_3 , текущего через антенну, концентрации электронов или интенсивности свечения плазмы Int_3 или ионного тока i_{b3} , извлекаемого из источника ионов, от мощности ВЧ-генератора при условии, что к одному и тому же ВЧ-генератору параллельно с антенной были подсоединены обкладки конденсатора, охватывающего разрядный объем (схему эксперимента см. на рис. 3).

Сравнение между собой измеряемых величин позволило изучить влияние емкостной составляющей на характеристики ВЧ-разряда.

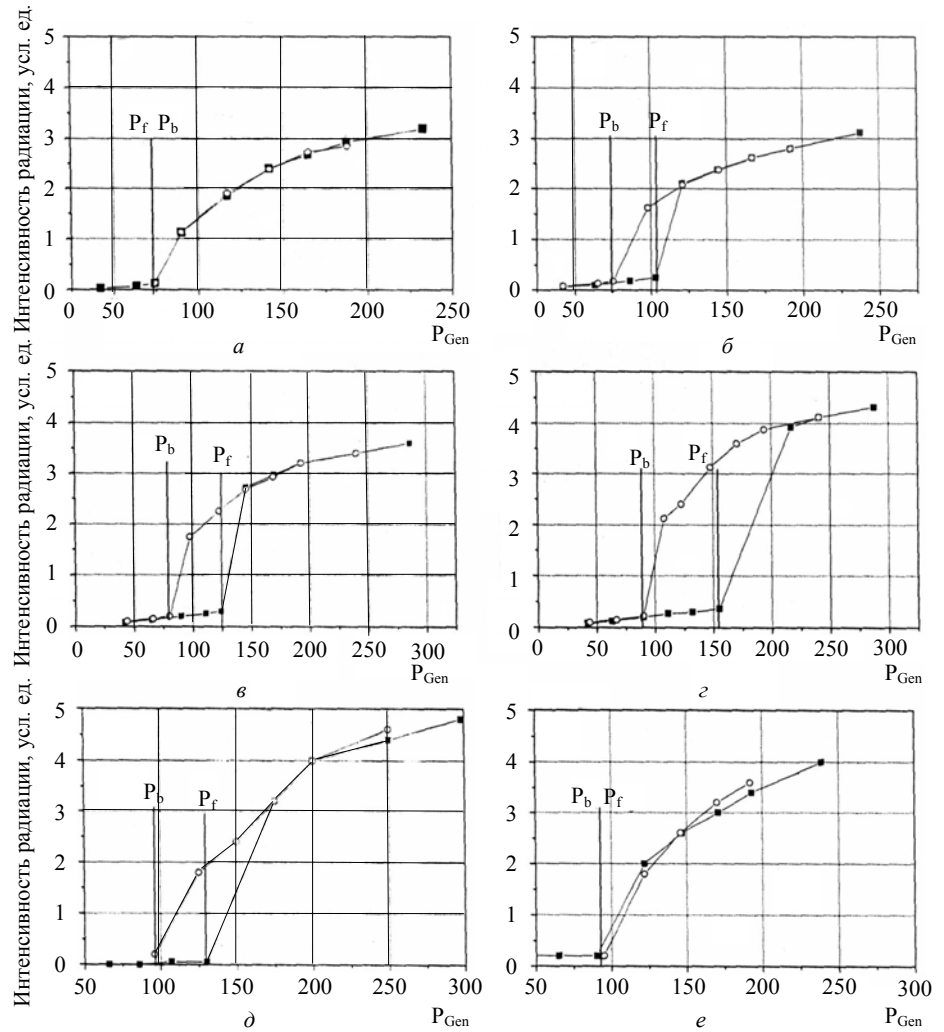
Результаты эксперимента

В настоящее время в литературе [3] принята точка зрения, что индуктивный разряд поджигается и горит при малых ВЧ-мощностях в емкостной моде, существующей за счет разницы межвитковых потенциалов. При достижении некоторой критической мощности ВЧ-разряд переходит в индуктивную моду, характеризующуюся более высокой плотностью плазмы, чем емкостная мода. В ряде случаев при переходе из моды с низкой плотностью плазмы в моду с высокой плотностью наблюдается гистерезис зависимости плотности плазмы от ВЧ-мощности. Одна из причин [3] существования гистерезиса связана с возможностью существования разряда в двух модах при одной и той же мощности ВЧ-генератора [3]. Очевидно, что область перехода разряда из моды с низкой плотностью плазмы в моду с высокой плотностью является удобным объектом для изучения влияния емкостной составляющей на свойства ВЧ-разряда. Известно, что появлению гистерезиса способствуют уменьшение атомного веса и понижение давления рабочего газа, увеличение расстояния между антенной и плазмой. В настоящей работе основное внимание было уделено изучению влияния внешнего магнитного поля на характер зависимости плотности плазмы от величины ВЧ-мощности.

В предыдущей работе серии [2] показано, что изменение величины внешнего магнитного поля сопровождается перераспределением плотности плазмы по объему источника плазмы. В связи с этим в настоящей работе в большинстве экспериментов контролировалось интегральное свечение плазмы, излучаемое центральной областью источника плазмы. Измерения показали, что при минимальном из рассмотренных давлений

2 мТорр и магнитных полях, меньших 1 мТл, гистерезис зависимости свечения плазмы Int_1 от мощности ВЧ-генератора P_{Gen} отсутствует. Типичный вид $Int_1(P_{Gen})$ приведен на рис. 4, а. Как видно, разряд зажигается в моде с низкой интенсивностью свечения (далее "низкая" мода). По мере роста мощности ВЧ-генератора происходит скачкообразный переход разряда в моду с высокой интенсивностью свечения (далее "высокая" мода). При уменьшении мощности ВЧ-генератора скачок из "высокой" моды в "низкую" происходит при том же значении P_b , что и при увеличении мощности генератора P_f . Ситуация изменяется с ростом магнитного поля (см. рис. 4, б—г). Здесь появляется гистерезис, и значения P_b оказываются меньше P_f , причем разница в значениях P_b и P_f растет с увеличением магнитного поля. Обращает на себя внимание также и тот факт, что с ростом магнитного поля при переходе из "низкой" моды разряда в "высокую" плотность плазмы возрастает сильнее. При магнитных полях, превышающих 1,4 мТл, максимальная мощность ВЧ-генератора 300 Вт оказывается недостаточной для организации перехода разряда из "низкой" в "высокую" моду.

Рис. 4. Зависимость интенсивности свечения плазмы от мощности ВЧ-генератора, питающего антенну, при увеличении (□) и уменьшении (○) мощности при магнитных полях:
a — 1 мТл; *б* — 1,2 мТл;
в — 1,3 мТл; *з*, *д*, *е* — 1,4 мТл;
a-б — индуктивный разряд;
д — гибридный разряд; *е* — разряд с независимыми индуктивным и емкостным каналами,
 мощность ВЧ-генератора, питающего емкостной канал — 100 Вт.
 Давление аргона 2 мТорр



Рассмотрим зависимость концентрации плазмы на оси в центральном сечении источника плазмы, измеренной при увеличении и уменьшении величины внешнего магнитного поля при фиксированной мощности ВЧ-генератора, представленную на рис. 5. Можно видеть, что значения магнитного поля B_f , при которых происходит срыв разряда при увеличении магнитного поля, существенно выше величин B_b , при которых происходит поджиг разряда при уменьшении магнитного поля. Полученный результат легко понять, учитывая характер результатов, приведенных на рис. 4. Чем больше магнитное поле, тем выше значения ВЧ-мощности, при которых разряд может существовать в моде с высокой интенсивностью свечения. Очевидно, что срыв разряда наблюдается при магнитном поле, при котором разряд не существует в высокой моде при данной мощности ВЧ-генератора. При уменьшении магнитного поля поджиг разряда происходит при магнитном поле B_b , при котором разряд существует только в высокой моде при данной мощности ВЧ-генератора.

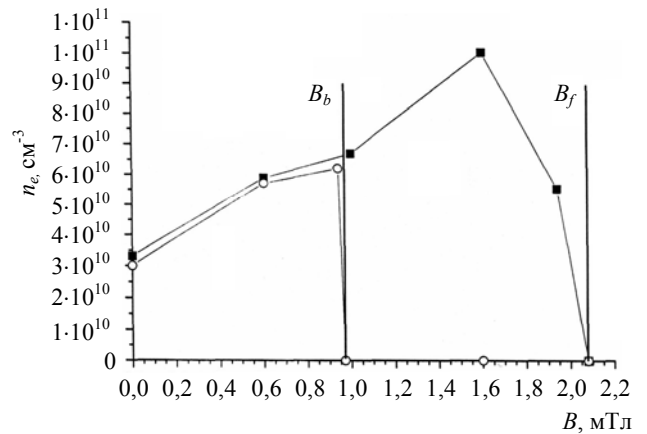


Рис. 5. Зависимость концентрации плазмы в центральном сечении на оси источника плазмы от магнитного поля при увеличении (□) и уменьшении (○) B .

Давление аргона 3 мТорр, мощность ВЧ-генератора 200 Вт

В литературе наличие гистерезиса обычно связывают с наличием емкостной составляющей разряда. Чтобы разобраться с проявлением емкостной составляющей, была выполнена серия экспериментов, соответствующая пунктам 2, 3 плана экспериментальных работ (см. выше). Результаты измерений интенсивности свечения плазмы при увеличении мощности ВЧ-генератора представлены на рис. 6.

Как видно из рис. 6, наличие независимого емкостного канала приводит к понижению критической мощности P_f , вкладываемой через индуктивный канал, при которой разряд переходит в моду с высокой интенсивностью свечения. Эксперименты показали, что чем большая доля ВЧ-мощности вкладывается через емкостной канал, тем больше понижается P_f . Одновременно с понижением P_f переход из моды с низкой интенсивностью свечения в высокую становится более плавным. Случай параллельного подсоединения антенны и конденсатора приводит к тем же качественным результатам, однако изменение P_f выражено значительно слабее. Это, по-видимому, связано с тем, что через емкостной канал вводится мощность менее 100 Вт.

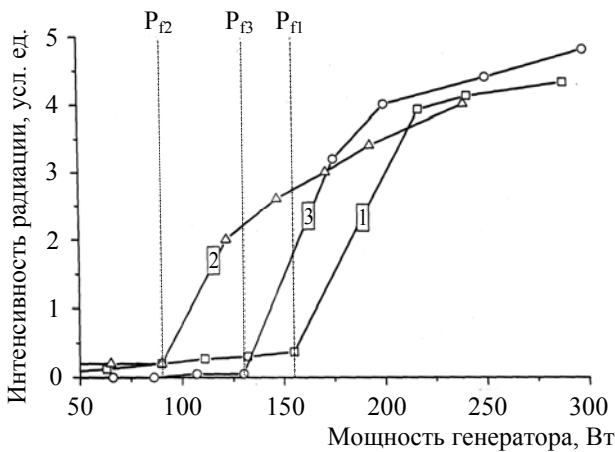


Рис. 6. Зависимость интенсивности свечения плазмы от мощности ВЧ-генератора, к которому подключена торцевая спиральная антенна:

1 — чисто индуктивный разряд; 2 — независимый емкостной канал, мощность ВЧ-генератора, питающего емкостной канал, равна 100 Вт; 3 — спиральная антенна и конденсатор подключены параллельно к одному генератору

При наличии емкостной составляющей разряда значения P_b также претерпевают изменения. Как видно из рис. 4, d и e при параллельном подсоединении антенны и конденсатора разница между значениями P_f и P_b существенно меньше, чем в случае чисто индуктивного разряда, а при наличии независимого емкостного канала разница между значениями P_f и P_b и гистерезис исчезают. Таким образом, наличие емкостной составляющей приводит к стабилизации разряда и исчезновению гистерезиса в зависимости параметров плазмы от ВЧ-мощности и магнитного поля. К исчезновению гистерезиса приводит также увеличение давления аргона.

Отметим еще один важный результат настоящей работы. При параллельном подсоединении антенны и конденсатора в моде разряда с высокой интенсивностью свечения уменьшение тока через антенну по сравнению с чисто индуктивным разрядом не превышало 10 % при всех рассмотренных условиях эксперимента (рис. 7). Интенсивность свечения плазмы в "высокой" моде разряда также слабо зависела от наличия емкостной компоненты разряда (см. рис. 6). Аналогичный вывод был сделан в экспериментах с источником ионов. Ток ионов и ток через антенну в "высокой" моде

разряда при наличии емкостной компоненты разряда изменялись не более чем на 10 % (рис. 8).

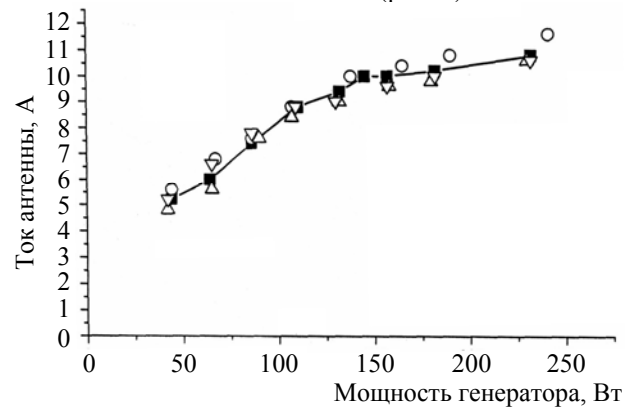
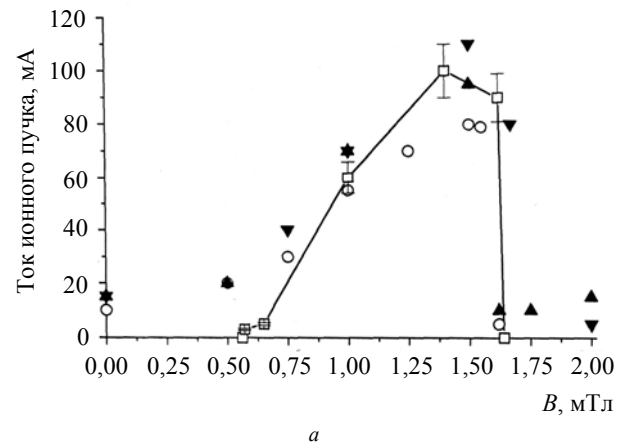
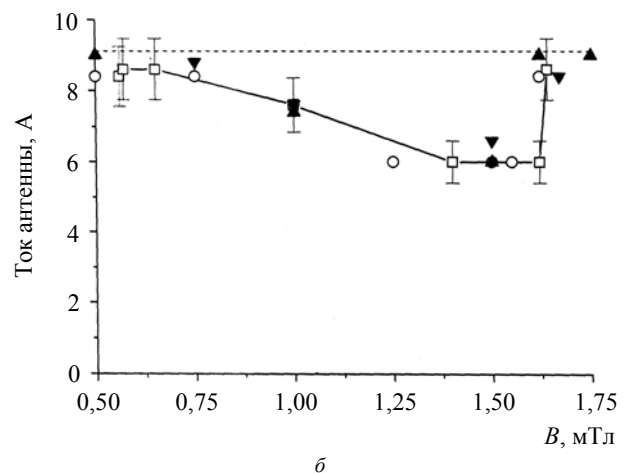


Рис. 7. Зависимость тока антенны от мощности ВЧ-генератора, к которому подключена торцевая спиральная антенна:

□ — чисто индуктивный разряд; △ — независимый емкостной канал. Мощность ВЧ-генератора, питающего емкостной канал, равна 100 Вт (▽) и 200 Вт (△); ○ — гибридный разряд



a



б

Рис. 8. Зависимость ионного тока (а) и тока антенны (б) от мощности ВЧ-генератора, к которому подключена торцевая спиральная антенна:

□ — чисто индуктивный разряд; ○, △ — независимый емкостной канал. Мощность ВЧ-генератора, питающего емкостной канал, равна 100 и 200 Вт, соответственно; ▽ — гибридный разряд

Таким образом, эксперименты, выполненные на частоте 13,56 МГц, показали, что наличие емкостной составляющей разряда проявляет себя в понижении ВЧ-мощности, необходимой для перехода разряда в моду разряда с высокой плотностью плазмы, вместе с тем параметры плазмы в моде с высокой плотностью слабо зависят от наличия емкостной составляющей.

Выводы

1. При давлении аргона 2 мТорр и магнитных полях, превышающих 1 мТл, зафиксировано наличие гистерезиса параметров плазмы от мощности ВЧ-генератора.
2. При давлении аргона 2 мТорр при фиксированной мощности ВЧ-генератора обнаружено наличие гистерезиса параметров плазмы от величины внешнего магнитного поля.
3. Увеличение давления аргона приводит к исчезновению гистерезиса.
4. Наличие независимого емкостного канала приводит к понижению критической мощности, вкладываемой через индуктивный канал, при которой разряд переходит в "высокую" моду. Увеличение ВЧ-мощности, вкладываемой через емкостной канал, при-

водит к понижению критической мощности и исчезновению гистерезиса.

5. Параметры плазмы в "высокой" моде разряда при рассмотренных условиях эксперимента слабо зависят от наличия емкостной составляющей разряда.

Л и т е р а т у р а

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. I. Особенности, наблюдавшиеся при экспериментальном исследовании индуктивного ВЧ-разряда, помещенного во внешнее магнитное поле// Прикладная физика. 2005. № 4. С. 70—74.
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. Исследование индуктивного ВЧ-разряда как самосогласованной системы. II. Исследование параметров плазмы и эффективности поглощения ВЧ-мощности плазмой индуктивного ВЧ-разряда низкого давления// Там же. 2005. № 5. С. 72—78.
3. Turner M. M., Liberman M. A.// Plasma Sources Sci. Technol. 1999. № 8. P. 313—324.
4. Suzuki K., Nakamura K., Ohkubo H., Sugai H.// Ibid. 1988. № 7. P. 13—20.
5. Godyak V. A., Piejak R. B., Alexandrovich B. M.// J. of Appl. Phys., 1999. V. 85. № 2. P. 703—712.

Статья поступила в редакцию 30 марта 2005 г.

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

Part III. Examination of influence of a capacitive component on plasma parameters in 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, V. P. Savinov

General Physics Institute, Moscow, Russia

In the third part of a series of operations the account is taken of results for examination of influence of a capacitive coupling between the antenna and plasma on features of high-frequency power input in plasma and on discharge characteristics. For this purpose the capacitive coupling had been increased, and the magnetic coupling between the antenna and plasma had been remained invariable. Consideration was made to the discharge without a magnetic field, and also at magnetic field relevant to requirements of an electron-cyclotron resonance and requirements of excitation of helicons and waves of Triwelpace-Gold in plasma.

* * *