

УДК 533.9

Исследование индуктивного ВЧ-разряда как самосогласованной системы

Часть VII. Математическое моделирование индуктивного ВЧ-разряда с емкостной компонентой (самосогласованная модель)*

*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

Настоящая, завершающая седьмая часть серии работ посвящена математическому моделированию индуктивного разряда с емкостной компонентой, изучению влияния емкостной составляющей разряда на параметры разряда. Показано, что индуктивная составляющая ВЧ-разряда "ответственна" за появление скачкообразного перехода из моды разряда с низкой концентрацией электронов в моду с высокой концентрацией. Емкостная составляющая разряда приводит к уменьшению критической мощности, при которой происходит скачок, и более плавному переходу из "низкой" в "высокую" моду разряда.

* Части I, II, III, IV, V и VI данной серии статей опубликованы в журнале "Прикладная физика", № 4 и 5, 2005 г.; № 1, 2, 4 и 5, 2006 г., соответственно.

В предшествующих работах настоящей серии [1—5] выполнены экспериментальные исследования индуктивного ВЧ-разряда, ставящие своей целью рассмотреть 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. В работе [6] продолжен анализ закономерностей перераспределения ВЧ-мощности между активными сопротивлениями антенны и плазмы с помощью математического моделирования. Ранее в работе [7] была представлена самосогласованная модель геликонных источников плазмы, которая ярко продемонстрировала влияние потерь ВЧ-мощности во внешней цепи на работу геликонных источников плазмы.

мы низкого давления. В работе [6] самосогласованная модель применена к исследованию особенностей работы индуктивных ВЧ-источников плазмы без магнитного поля, ЭЦР и геликонных источников. Полученные решения самосогласованной задачи показали, что индуктивный ВЧ-разряд может существовать в двух модах: с низкой и высокой концентрацией электронов, причем в ряде случаев в области перехода из "низкой" в "высокую" моду имеет место многозначность решений, что может являться причиной гистерезиса. Таким образом, только в рамках механизма индуктивного разряда без учета влияния емкостной составляющей возможно объяснение наблюдаемых экспериментально скачков плотности и гистерезиса, связываемых в литературе [8, 9] обычно с переходом из емкостной моды разряда в индуктивную и обратно. Настоящая, завершающая серия работы посвящена математическому моделированию индуктивного разряда с емкостной компонентой, изучению влияния емкостной составляющей разряда на параметры разряда.

Простая физическая модель ВЧ-разряда с емкостной компонентой

В работе [6] для нахождения связи между мощностью, поглощенной плазмой P_{Pl} , и параметрами плазмы чисто индуктивного разряда были использованы уравнения баланса для числа:

ионов

$$Vn_0n_eZ_{ion} = 0,4n_iS\sqrt{\frac{2kT_e}{M}}; \quad (1)$$

электронов

$$Vn_0n_eZ_{ion} = 0,25n_eS_e\sqrt{\frac{8kT_e}{\pi m}}\exp\left(-\frac{e\phi}{kT_e}\right); \quad (2)$$

нейтралов

$$N' = 0,4n_iS_i\sqrt{\frac{2kT_e}{M}} + 0,25n_0S_a\sqrt{\frac{2kT_g}{\pi M}} \quad (3)$$

и уравнения квазинейтральности

$$n_e = n_i. \quad (4)$$

В формулах (1)–(4):

n_e, n_i — концентрация нейтральных частиц электронов и ионов, соответственно;

V, S, S_a, S_i, S_e — объем, полная площадь поверхности источника и поверхность, на которую могут выпадать атомы, ионы и электроны, соответственно;

k — постоянная Больцмана;

N' — количество частиц нейтрального газа, поступающего в газоразрядную камеру в единицу времени;

T_e, T_g — температура электронов и атомов, соответственно;

M, m — масса тяжелых частиц и электронов, соответственно;

ϕ — потенциал плазмы относительно стенок.

Для модернизации системы уравнений (1)–(4) так,

чтобы она стала пригодной для описания разряда, вспомним, что при низких давлениях $p < 10^{-2}$ Торр [10] емкостный разряд, как правило, реализуется в так называемом γ -режиме, который характеризуется наличием приэлектродных слоев с существенным падением в них потенциала V_s и эмиссией с электродов. Для упрощения задачи будем считать приэлектродные слои пространственного заряда тонкими и пренебрежем потерями мощности на создание пучков электронов в приэлектродных слоях, т. е. будем считать, что в емкостном разряде ВЧ-мощность расходуется только на нагрев электронов плазмы. Это даст нам возможность оценить концентрацию плазмы сверху. Очевидно, что при сделанных предположениях уравнения (1)–(4) вполне пригодны для описания плазмы ВЧ-разряда с индуктивной и емкостной компонентами. Отметим, что в емкостном разряде электроны не могут выпадать на области поверхности газоразрядной камеры, закрытой электродами—обкладками конденсатора (они находятся под большим отрицательным потенциалом относительно плазмы), поэтому площадь S_e , куда могут выпадать электроны в емкостном разряде, меньше, чем в индуктивном.

Основное отличие системы уравнений, описывающей разряд с емкостной компонентой, от системы уравнений баланса для индуктивного разряда кроется в уравнении баланса мощности, фиксирующем равенство мощности, вложенной в разряд, сумме потерь. Последняя определяется уносом мощности на стенки газоразрядной камеры источника плазмы ионами и электронами, а также потерями на ионизацию и излучение в объеме источника [6]. В индуктивном разряде мощность, выносимая ионами на стенки источника, определяется плотностью ионного тока j_i и потенциалом плазмы ϕ относительно стенок. Как правило, величина ϕ не превосходит 50 В. В емкостном разряде ионы по-прежнему выносят мощность $j_i\phi$ на части стенок газоразрядной камеры, не занятой электродами, однако на части стенок, закрытых электродами (обкладками конденсатора), ионы будут выносить мощность, пропорциональную V_s . Напомним, что падение потенциала в слоях γ -режима емкостного разряда может быть существенно выше 50 В [10]. Это говорит о наличии более высоких потерь мощности в емкостном разряде по сравнению с индуктивным.

С учетом сказанного запишем уравнение баланса мощности в виде

$$P_{Pl} = 0,4en_iS\sqrt{\frac{2kT_e}{M}}S\left(\phi\frac{S-S_s}{S} + V_s\frac{S_s}{S} + \frac{2kT_e}{e} + U_i(1+W(kT_e))\right), \quad (5)$$

где S_s — площадь стенок газоразрядной камеры, закрытых обкладками конденсатора, соответственно;

U_i — потенциал ионизации;

$W(kT_e)$ — доля потерь энергии на излучение атомов.

Методика и результаты расчета скорости ионизации и потерь на излучение изложены в [7].

На рис. 1 показано типичное решение системы уравнений (1)–(5), описывающее изменение парамет-

ров плазмы ВЧ-разряда при увеличении мощности, вложенной в плазму. Отметим еще раз, что полученные значения плотности плазмы являются оценкой сверху, так как в системе уравнений баланса не учитывались потери энергии на генерацию пучков электронов и поддержание концентрации заряженных частиц в приэлектродных слоях. Как видно из рис. 1, концентрация электронов возрастает пропорционально вкладываемой мощности вплоть до некоторого значения плотности плазмы, затем происходят насыщение и уменьшение n_e с ростом ВЧ-мощности. Анализ показал, что отклонение от линейного роста концентрации электронов с ВЧ-мощностью начинается там, где плотность плазмы приближается к концентрации нейтральных частиц. В дальнейшем, как и в работах [6, 7], рассмотрение было ограничено линейным участком зависимости $n_e(P_{Gen})$.

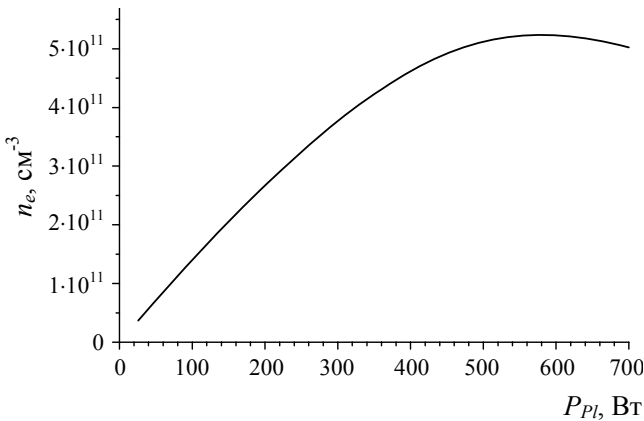


Рис. 1. Зависимость концентрации электронов от величины ВЧ-мощности, вложенной в плазму

Самосогласованная модель разряда с независимыми индуктивным и емкостным каналами

Для того чтобы получить систему уравнений, описывающую разряд самосогласованно, систему уравнений (1)–(5) необходимо дополнить уравнением, связывающим ВЧ-мощность, отдаваемую во внешнюю цепь, с параметрами плазмы.

Рассмотрим случай, когда на внешней поверхности источника плазмы расположены спиральная антенна и обкладки конденсатора (см. рис. 1, 2 в работе [3]), причем индуктивный и емкостный каналы питаются от двух независимых ВЧ-генераторов. На рис. 2 приведена эквивалентная схема разряда. Плазма представлена в виде активной R и реактивной L нагрузок, включенных как в индуктивную, так и в емкостную цепи разряда. ВЧ-мощность от первого генератора идет на нагрев антенны и плазмы индуцированными токами. ВЧ-мощность от второго генератора идет на нагрев плазмы при прохождении тока через цепь, состоящую из емкостей C_1, C_2 и сопротивления R , величина которого определяется омическим сопротивлением плазмы. Величины емкостей C_1, C_2 определяются площадью обкладок конденсатора и расстоянием между обкладками и плазмой, которое складывается из толщины стенок и толщины слоя между плазмой и стенками

газоразрядной камеры.

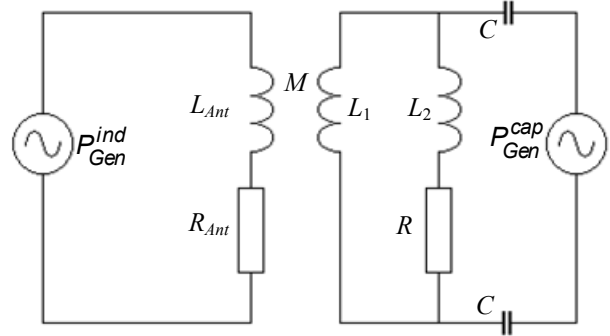


Рис. 2. Эквивалентная схема ВЧ-разряда, поддерживаемого независимыми индуктивным и емкостным каналами

Очевидно, что мощность, поглощаемая плазмой, складывается из мощности, вложенной через индуктивный P_{Pl}^{ind} и емкостный P_{Pl}^{cap} каналы

$$P_{Pl} = P_{Pl}^{cap} + P_{Pl}^{ind}.$$

Будем считать, что вся мощность от "емкостного" генератора без потерь вкладывается в емкостную моду разряда, т. е.

$$P_{Gen}^{cap} = P_{Pl}^{cap},$$

а мощность, вкладываемая через индуктивный канал, так же как и в чисто индуктивном разряде, определяется выражением

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

где R_{Ant}, R_{Pl} — активное сопротивление антенны и эквивалентное сопротивление плазмы, соответственно;

I — ток, текущий через антенну.

Существенным отличием модели индуктивного разряда с емкостной компонентой от чисто индуктивного разряда является тот факт, что здесь параметры плазмы определяются полной мощностью, вкладываемой в плазму через оба канала. При этом величина эквивалентного сопротивления плазмы оказывается зависящей как от мощности, вкладываемой через индуктивный канал, так и от мощности, вкладываемой через емкостный канал.

Ограничив рассмотрение областью мощностей P_{Pl} , при которых плотность плазмы растет пропорционально P_{Pl} , получим искомое выражение, связывающее ВЧ-мощности обоих генераторов с эквивалентным сопротивлением плазмы R_{Pl} и ее концентрацией.

$$\begin{aligned} P_{Pl} &= P_{Pl}^{cap} + P_{Pl}^{ind} = P_{Pl}^{cap} + I^2 R_{Pl} = \\ &= 0, 4e n_i S \sqrt{\frac{2kT_e}{M}} S \left(\phi \frac{S - S_s}{S} + V_s \frac{S_s}{S} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{2kT_e}{e} + U_i (1 + W(kT_e)) \right) = \alpha n_e. \end{aligned} \quad (6)$$

Система нелинейных уравнений (1)–(6) решалась методом итераций.

Результаты расчета

На рис. 3 представлены зависимости плотности плазмы n_e в ВЧ-разряде от мощности ВЧ-генератора P_{Gen}^{ind} , питающего индуктивный канал в чисто индуктивном разряде, а также при условии, что через емкостный канал дополнительно вводится 5 Вт. Здесь же отмечена концентрация электронов, которая существовала бы в источнике плазмы при условии, что мощность (5 Вт) вводится только через емкостный канал.

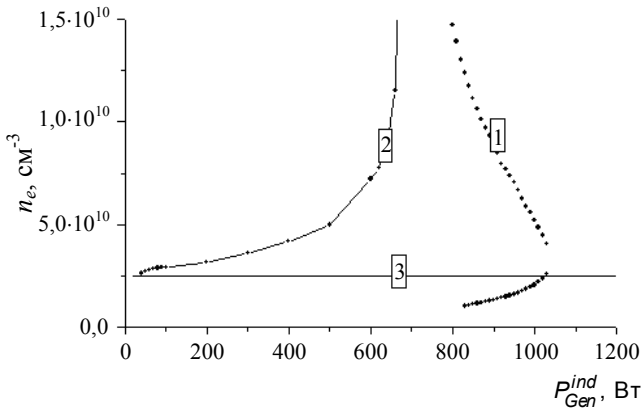


Рис. 3. Зависимости плотности плазмы (1) от мощности ВЧ-генератора, питающего индуктивный канал в чисто индуктивном разряде, а также при условии, что через емкостный канал дополнительно вводится 5 Вт (2); 3 — концентрация электронов, которая существовала бы в источнике плазмы при условии, что мощность (5 Вт) вводится только через емкостный канал

Проанализируем качественно взаимное влияние двух каналов ввода ВЧ-мощности, пользуясь рис. 3 и эквивалентной схемой, приведенной на рис. 2. Как известно из [8] и как показывают наши расчеты, в широком диапазоне условий емкостная фаза разряда может существовать при меньших мощностях ВЧ-генератора, чем индуктивная, при этом в разряде устанавливается некоторая концентрация электронов n_e^* . Помня, что антенна подключена к "индуктивному" генератору, очевидно, что с появлением плазмы во внешней цепи "индуктивного" генератора появляется эквивалентное сопротивление, величина которого определяется n_e^* , т. е. фактически ВЧ-мощностью, вкладываемой через емкостный канал. Когда концентрация электронов, определяемая емкостным каналом, больше концентрации электронов n_e^{ind} , которая существовала бы в источнике плазмы при отсутствии емкостного канала, вклад ВЧ-мощности в плазму через индуктивный канал возрастает по сравнению со случаем, когда емкостный канал отсутствует. Это и показали решения, представленные на рис. 4.

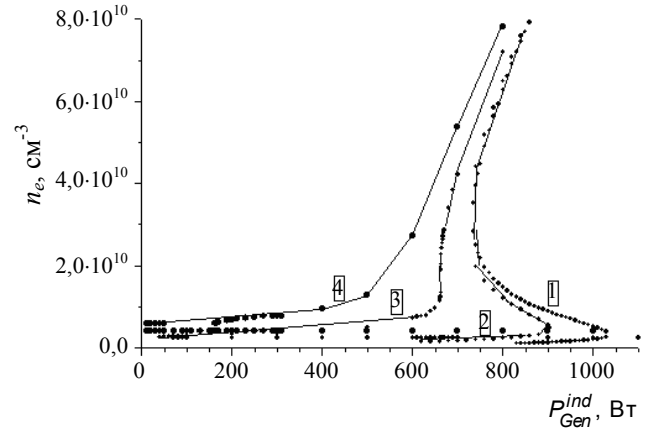


Рис. 4. Зависимость плотности плазмы от мощности ВЧ-генератора P_{Gen}^{ind} , питающего индуктивный канал при различных значениях мощности, вкладываемой через емкостный канал P_{Gen}^{cap} : 1 — 0 Вт; 2 — 1 Вт; 3 — 5 Вт; 4 — 10 Вт

На рис. 4 дана зависимость плотности плазмы n_e в ВЧ-разряде от мощности ВЧ-генератора P_{Gen}^{ind} , питающего индуктивный канал при различных значениях мощности, вкладываемой через емкостный канал P_{Gen}^{cap} .

В случае, когда $P_{Gen}^{cap} = 0$, для зависимости $n_e (P_{Gen}^{ind})$ при переходе из моды с низкими значениями концентрации плазмы в моду с высокими значениями характерно наличие нескольких решений [6], обычно связываемых с существованием гистерезиса. Однако по мере роста P_{Gen}^{cap} область мощностей "индуктивного" генератора, где существует многозначность решений, сначала сужается, а затем исчезает. Таким образом, наличие емкостного канала ввода ВЧ-мощности приводит к исчезновению гистерезиса в зависимости $n_e (P_{Gen}^{ind})$. Аналогичный результат был получен при экспериментальном исследовании индуктивного разряда с емкостной компонентой.

Как отмечалось выше, наличие емкостного канала ввода ВЧ-мощности приводит к увеличению плотности плазмы по сравнению с чисто индуктивным разрядом. Увеличение концентрации электронов в области $n_e < 10^{12} \text{ см}^{-3}$ сопровождается ростом эквивалентного сопротивления [3]. В работе [6] было показано, что увеличение эквивалентного сопротивления плазмы приводит к исчезновению гистерезиса и в рамках модели чисто индуктивного разряда.

Суммируя полученные результаты, можно сделать вывод, что индуктивная составляющая разряда "ответственна" за появление скачкообразного перехода из моды разряда с низкой концентрацией электронов в моду с высокой концентрацией. Емкостная составляющая разряда приводит к уменьшению критической мощности, при которой происходит скачок, и более плавному переходу из "низкой" в "высокую" моду разряда. Наличие внешнего магнитного поля не приводит к качественным изменениям сделанных выше выводов

(рис. 5).

В разрядах с внешним магнитным полем возможно еще одно проявление емкостной составляющей ВЧ-разряда. Как отмечалось в работах [5—7], осцилляционный характер эквивалентного сопротивления плазмы проявляется в немонотонной зависимости концентрации плазмы n_e от магнитного поля B при фиксированной мощности ВЧ-генератора. Рис. 6 показывает, что в

чисто индуктивной моде при некоторых значениях магнитного поля возможны срывы разряда. Наличие емкостной составляющей разряда приводит к появлению решений в области магнитных полей, где чисто индуктивный разряд не-возможен. В целом наличие емкостной составляющей приводит к сглаживанию колебаний плотности электронов при изменении внешнего магнитного поля.

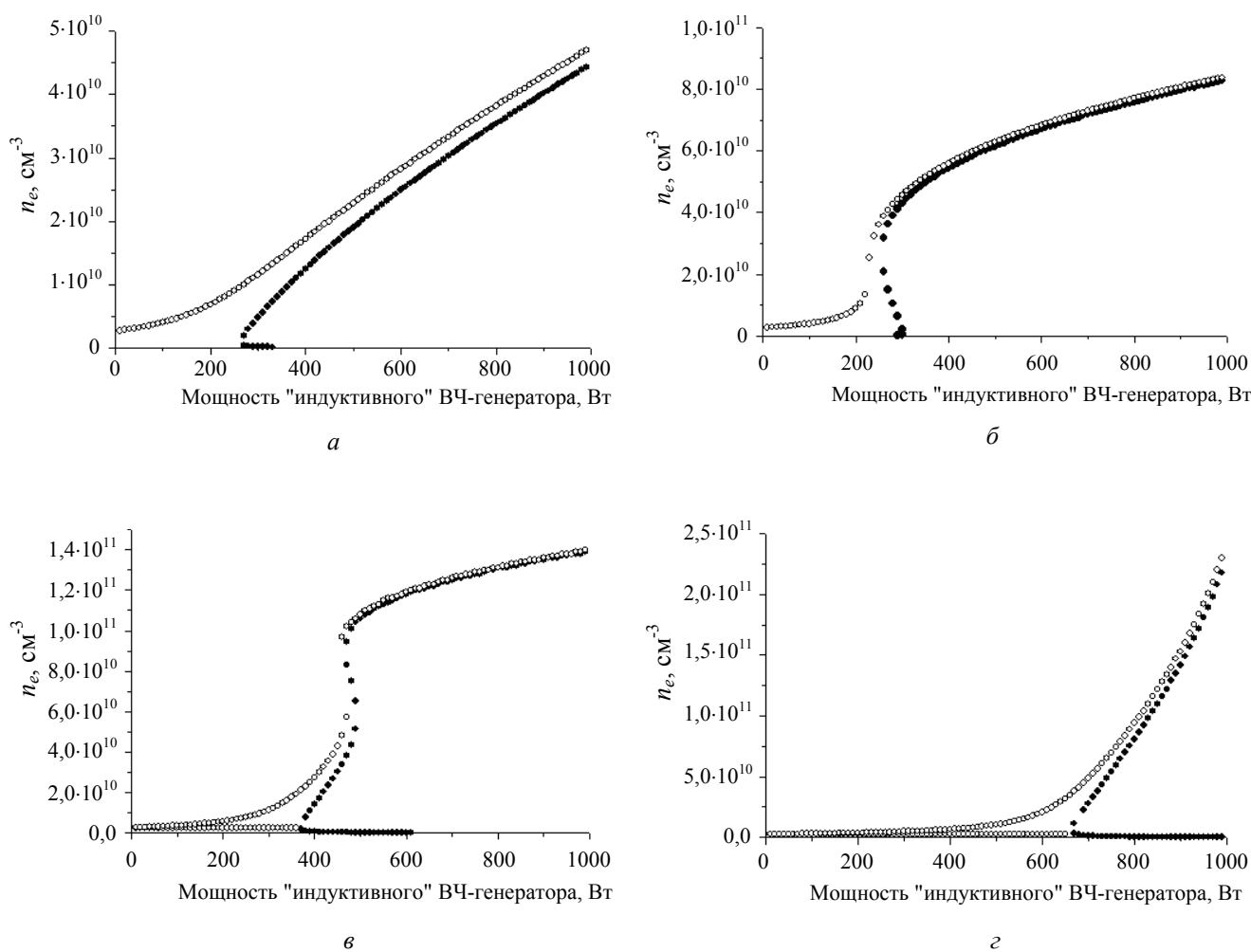


Рис. 5. Зависимость концентрации электронов от мощности "индуктивного" ВЧ-генератора при магнитных полях:
 а — 10 Гс; б — 15 Гс; в — 30 Гс; г — 40 Гс.

Черными кружками отмечены решения, полученные в модели чисто индуктивного разряда, светлыми — решения, полученные в предположении, что через емкостный канал дополнительно вкладывается 5 Вт

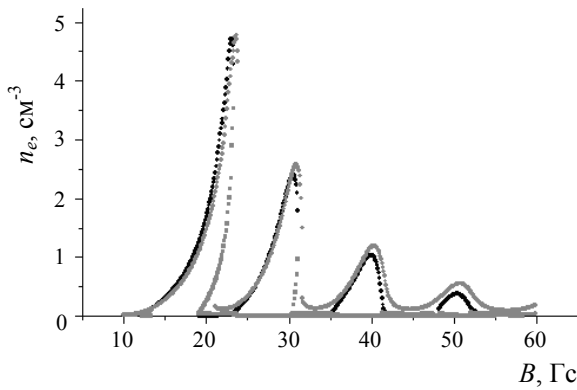


Рис. 6. Зависимость концентрации электронов от величины внешнего магнитного поля при мощности "индуктивного" ВЧ-генератора 300 Вт.

Черные кружки — расчет для чисто индуктивного разряда, светлые кружки — решения, полученные в предположении, что через емкостный канал дополнительно вкладывается 5 Вт

Модель гибридного разряда

Рассмотрим гибридный разряд, т. е. случай, когда индуктивный и емкостный каналы подключены к одному ВЧ-генератору (см. рис. 1, 3 в работе [3]). Этот случай моделирует реальный разряд, где емкостный канал организуется благодаря наличию паразитных емкостей между антенной и плазмой.

Учитывая условность представления разряда в виде эквивалентной схемы, на рис. 7 приводится эквивалентная схема разряда. Плазма представляется в виде активной R и реактивной L нагрузки, включенной как в индуктивную, так и в емкостную цепи разряда. ВЧ-мощность от генератора идет на нагрев антенны и плазмы индуцированным током, а также на нагрев плазмы при прохождении тока через цепь, состоящую из емкостей C_1, C_2 , и сопротивления R , величина которого определяется омическим сопротивлением плазмы. Величины емкостей C_1, C_2 определяются площадью обкладок конденсатора и расстоянием между обкладками и плазмой, которое складывается из толщины стенок и толщины слоя между плазмой и стенками газоразрядной камеры. При составлении схемы предполагалось для простоты, что часть ВЧ-мощности замыкается через конденсатор, в реальном разряде работает емкость между поверхностью антенны и плазмой.

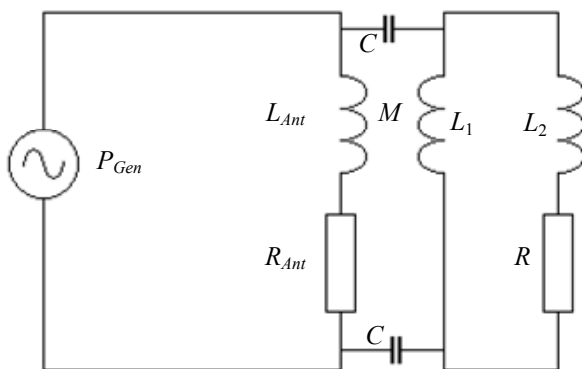


Рис. 7. Эквивалентная схема гибридного разряда

Очевидно, что построение самосогласованной задачи гибридного разряда в общем случае очень сложно. Действительно, в случае гибридного разряда изменение

мощности ВЧ-генератора приводит к самосогласованному изменению не только параметров плазмы, но и долей мощности, вкладываемой в плазму через емкостный и индуктивный каналы. Однако, сделав некоторые предположения, можно оценить взаимное влияние двух каналов.

Предположим, что влияние емкостного канала на параметры плазмы мало, тогда в первом приближении можно воспользоваться эквивалентной схемой чисто индуктивного разряда и записать

$$P_{ind} = I_{ind}^2 * (R_{ant} + R_{pl}),$$

где I_{ind} — ток, текущий через антенну;

P_{ind} — мощность, выделяемая в индуктивной цепи.

Для того чтобы связать ток, текущий через антенну, с полным током, текущим в цепи генератора, сделаем некоторые оценки. В экспериментальной серии работ [1—3] использовалась антенна с индуктивностью ~ 2 мкГн. На частоте 13,56 МГц индуктивное сопротивление антенны составляет величину порядка 160 Ом. При условиях эксперимента оно существенно превышает сопротивление добавочной индуктивности, возникающей благодаря токам, индуцированным в плазме [10]. Активное сопротивление индуктивной ветви, включающей в себя активное сопротивление антенны и эквивалентное сопротивление плазмы как минимум на порядок меньше индуктивного сопротивления антенны [4, 5].

Оценим емкостное сопротивление конденсаторов. Оно определяется площадью обкладок конденсатора и расстоянием между обкладками конденсатора и плазмой. Последнее складывается из толщины стекла и толщины слоя объемного заряда d , существующего между стенками газоразрядной камеры под обкладками конденсатора и плазмой. Воспользовавшись выражением для толщины слоя, получим, что значения d , рассматриваемого разряда, составляют величину 0,5 мм и больше. Учитывая, что толщина верхнего фланца 3 см, а площадь обкладок конденсатора 25 см², получим, что емкостное сопротивление конденсатора C определяется толщиной фланца и составляет величину, превышающую 10 кОм.

Таким образом, при условиях экспериментов [3], импеданс индуктивного канала Z_{ind} существенно меньше импеданса емкостного канала Z_{cap} , а ток, протекающий в цепи антенны I_{ind} ,

$$I_{ind} = I / (1 + Z_{ind}/Z_{cap}),$$

существенно превышает ток I_{cap} , текущий в емкостной цепи. Отметим также, что при сделанных предположениях отношение токов слабо зависит от параметров плазмы.

Очевидно, что ВЧ-мощность, вкладываемая в индуктивный и емкостный каналы, определяется выражениями

$$P_{ind} = I^2 * (R_{Ant} + R_{pl}) / (1 + Z_{ind}/Z_{cap})^2, \quad (7)$$

$$P_{cap} = P_{Gen} - P_{ind}. \quad (8)$$

Выражения (7), (8) дают возможность качественно проанализировать роль емкостной составляющей в

поддержании гибридного разряда. При низких мощностях ВЧ-генератора, когда горение чисто индуктивного разряда невозможно, разряд загорается в емкостной моде. Через емкостный канал в плазму вкладывается мощность, равная мощности ВЧ-генератора минус потери на нагрев антенны. Это приводит к появлению в индуктивной цепи эквивалентного сопротивления, величина которого определяется долей мощности, вложенной в плазму через емкостный канал. При более высоких мощностях генератора, когда концентрация электронов определяется долей мощности, поступающей через индуктивный канал, роль емкостной составляющей в поддержании разряда невелика. Концентрация электронов в "высокой" моде гибридного разряда отличается от концентрации в чисто индуктивном разряде множителем $1/(1+Z_{ind}/Z_{cap})$, который в большинстве экспериментов на частоте 13,56 МГц близок к единице. Качественно поведение гибридного разряда близко к поведению разряда с независимыми каналами ввода ВЧ-мощности.

Настоящая работа включает цикл статей, посвященных исследованию индуктивного ВЧ-разряда как самосогласованной системы. В целом полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Мощность ВЧ-генератора, отдаваемая во внешнюю цепь, идет на нагрев антенны ВЧ-то-ком, протекающим по ней, а также на нагрев плазмы электрическими полями, индуцированными токами, протекающими по антенне. Часть ВЧ-мощности вкладывается в плазму через емкостный канал, существующий благодаря наличию паразитной емкости между антенной и плазмой.

2. Доля мощности, вкладываемая в плазму через индуктивный канал, определяется эквивалентным сопротивлением плазмы, в свою очередь зависящим от параметров плазмы.

3. Эквивалентное сопротивление индуктивного разряда без магнитного поля немонотонно зависит от плотности плазмы. Это объясняется конкуренцией двух факторов: с одной стороны, поглощение ВЧ-мощности растет с ростом концентрации электронов, с другой стороны — глубина скин-слоя, определяющая ширину области поглощения ВЧ-мощности, убывает с ростом n_e . Основным фактором, приводящим к существенному росту эквивалентного сопротивления плазмы, является увеличение частоты столкновений электронов с тяжелыми частицами.

4. Использование внешнего магнитного поля в случае ВЧ-индуктивного разряда низкого давления ($p < 10$ мТорр) приводит к значительному повышению эффективности ввода ВЧ-мощности в плазму в области ЭЦР и области возбуждения геликонов и волн Трайвелписа-Голда по сравнению с разрядом без магнитного поля. В последней области значения эквивалентного сопротивления выше, чем в области ЭЦР.

5. Увеличение давления приводит к уменьшению эквивалентного сопротивления разряда с магнитным полем.

6. Индуктивная составляющая ВЧ-разряда "ответственна" за появление скачкообразного перехода из моды разряда с низкой концентрацией электронов в моду с высокой концентрацией. Емкостная составляющая разряда приводит к уменьшению критической мощности, при которой происходит скачок, и более плавному переходу из "низкой" в "высокую" моду разряда. Наличие внешнего магнитного поля не приводит к качественным изменениям сделанных выше выводов.

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 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. Часть II. Исследование параметров плазмы и эффективности поглощения ВЧ-мощности плазмой индуктивного ВЧ-разряда низкого давления//Там же. № 5. С. 72—78.
3. 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//Там же. 2006. № 1. С. 36—42.
4. 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 IV. Результаты исследования эквивалентного сопротивления индуктивного ВЧ-разряда низкого давления без магнитного поля//Там же. № 2. С. 41—46.
5. 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 V. Результаты исследования эквивалентного сопротивления индуктивного ВЧ-разряда низкого давления при наличии внешнего магнитного поля//Там же. № 4. С. 54—59.
6. 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 VI. Математическое моделирование индуктивного ВЧ-разряда (самосогласованная модель)//Там же. № 5. С. 34—39.
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. Самосогласованная модель ВЧ индуктивного источника плазмы, помещенного во внешнее магнитное поле//Физика плазмы. 2004. Т. 30. № 5. С. 434—449.
8. Turner M. M., Liberman M. A. Plasma Sources Sci. Technol. 1999. № 8. P. 313—324.
9. Suzuki K., Nakamura K., Ohkubo H., Sugai H. // Ibid. 1988. № 7. P. 13—20.
10. Godyak V. A., Piejak R. B., Alexandrovich B. M. // Ibid. 2002. № 11. P. 525—543.

Статья поступила в редакцию 30 марта 2005 г.

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

Part VII. Mathematical modelling the inductive high-frequency discharge with a capacitive component (the self-consistent model)

*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

The terminating seventh part of a series of investigations is dedicated to mathematical modelling the inductive discharge with a capacitive component, including study of influence of a discharge capacitive component on parameters of the discharge. The capacitive component of the discharge gives in diminution of the critical power, at which there is a jump transition from the mode of the discharge with a low electron concentration in the mode with a high concentration.

* * *