

ХИМИЧЕСКАЯ ФИЗИКА, ФИЗИЧЕСКАЯ КИНЕТИКА И ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

Экспериментальное изучение закономерностей энерговыделения в гибридном высокочастотном разряде низкого давления при изменении мощности высокочастотного генератора и давления аргона

А. Ф. Александров, К. В. Вавилин, Е. А. Кралькина^a, В. Б. Павлов, А. А. Рухадзе,
В. П. Савинов^b, Ч. Чжао, В. Г. Якунин

¹ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет,
кафедра физической электроники. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

E-mail: ^aekralkina@mail.ru, ^bsavinov1983@yahoo.com

Статья поступила 10.01.2010, подписана в печать 31.03.2010

Экспериментально изучаются закономерности энерговыделения в плазме новой модификации высокочастотного (ВЧ) разряда — гибридного ВЧ разряда, поддерживаемого как вихревыми, так и потенциальными ВЧ электрическими полями. Для организации такого разряда в работе используется узел ввода ВЧ мощности в виде параллельно соединенных индуктора и обкладок конденсатора. В настоящей работе представлены данные, полученные при изучении влияния величины мощности, поступающей в плазму, и давления аргона на эквивалентное сопротивление гибридного разряда, являющегося мерой способности плазмы поглощать ВЧ мощность. Рассмотрена роль емкостного канала в балансе ВЧ мощности, поступающей в разряд.

Ключевые слова: ВЧ разряд, гибридный ВЧ разряд, индуктивный и емкостной каналы разряда, эквивалентное сопротивление, импеданс.

УДК: 537.52. PACS: 52.50.-b, 52.80.Pi, 52.80.-s.

Введение

1. Эквивалентное сопротивление гибридного ВЧ разряда

На рис. 1 показана типичная схема организации гибридного ВЧ разряда. На боковой поверхности цилиндрического источника плазмы расположена спиральная антенна, формирующая индуктивную ветвь разряда. По антенне течет ток I_i . Параллельно антенне подключены обкладки конденсатора, расположенные на торцевых фланцах источника плазмы. Между антенной и обкладками конденсатора включена разделительная емкость C . Обкладки конденсатора вместе с разделительной емкостью формируют емкостную ветвь разряда. В емкостной цепи узла ввода ВЧ мощности течет ток I_c . На концах антенн с помощью ВЧ генератора создается ВЧ напряжение амплитуды U .

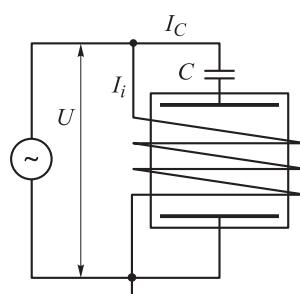


Рис. 1. Схема организации гибридного разряда

В общем случае величина ВЧ мощности, поглощаемой плазмой, определяется выражением [3]

Бурное развитие высоких технологий, ведущую роль в которых играют плазменные технологии, предъявляет все более высокие требования к параметрам реализуемых технологических процессов. Наиболее эффективными современными источниками плазмы являются устройства, созданные на основе использования высокочастотных разрядов низкого давления — индуктивного и емкостного. Как известно [1], в первом из них легко получается весьма плотная плазма с концентрацией зарядов $n \sim 10^{12} \text{ см}^{-3}$. Достоинством же емкостного разряда является значительное обогащение плазмы электронами высоких энергий, а также возможность формирования заданного электронного энергетического спектра [2]. Естественно, что возникает мысль о создании разряда, поддерживаемого как вихревыми, так и потенциальными ВЧ полями, плазма которого отличалась бы высокой плотностью и эффективно управляемым энергетическим спектром электронов. Организовать такой разряд можно, например, используя узел ввода ВЧ мощности в виде параллельно соединенных индуктора и обкладок конденсатора. В дальнейшем будем называть такой разряд «гибридным» ВЧ разрядом. В настоящей работе представлены данные, полученные при изучении влияния величины мощности, поступающей в плазму, и давления аргона на способность плазмы поглощать ВЧ мощность. Рассмотрена роль емкостного канала в балансе ВЧ мощности, поступающей в разряд.

$$P_{\text{pl}} = \frac{L\omega}{4} \int_0^R r [\varepsilon''_{\perp} |E_r|^2 + \varepsilon''_{\perp} |E_{\varphi}|^2 + \varepsilon''_{\parallel} |E_z|^2 + g''(E_{\varphi} E_r^* - E_r E_{\varphi}^*)] dr, \quad (1)$$

где E_{φ} , E_r , E_z — азимутальная, радиальная и продольная компоненты ВЧ электрического поля в плазме, ε''_{\perp} , $\varepsilon''_{\parallel}$, g'' — мнимые части компонентов тензора диэлектрической проницаемости плазмы. Интегрирование идет по всему объему плазмы.

В индуктивном разряде ВЧ электрические поля пропорциональны току, текущему в антенне I_i , поэтому уравнение (1) можно переписать в виде [4]

$$P_{\text{pl}} = \frac{1}{2} R_{\text{pl}}^h I_i^2,$$

где коэффициент пропорциональности между вложенной мощностью и квадратом тока, текущего через антенну, имеет размерность сопротивления и зависит только от свойств плазмы. Величина R_{pl}^h в работе [4] названа эквивалентным сопротивлением плазмы.

В случае гибридного разряда ВЧ поле \mathbf{E} в плазме представляет собой суперпозицию вихревого \mathbf{E}_v и потенциального \mathbf{E}_p полей:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_v + \mathbf{E}_p.$$

Вихревое поле определяются величиной тока I_i , текущего через индуктор, а потенциальное поле — напряжением U_c , приложенным к обкладкам конденсатора.

В случае параллельного подсоединения индуктора и обкладок конденсатора через разделительную емкость C напряжение U_c , приложенное к обкладкам конденсатора, определяется формулой

$$U_c = U - \frac{I_c}{\omega C} = I_i \left(Z_i - \frac{1}{\omega C} \frac{Z_c}{Z_c} \right).$$

Здесь Z_i , Z_c — импеданс индуктивной и емкостной ветвей разряда соответственно.

Таким образом, электрическое поле, приложенное к обкладкам конденсатора, а следовательно, и суммарное электрическое поле \mathbf{E} оказывается пропорциональным току, текущему через антенну. Это означает, что при рассмотрении гибридного разряда, также как и в случае чисто индуктивного разряда, из под знака интеграла (1) можно вынести квадрат тока, текущего через антенну I_i :

$$P_{\text{pl}} = \frac{1}{2} R_{\text{pl}}^h I_i^2.$$

Множитель R_{pl}^h , стоящий перед I_i^2 , имеет размерность сопротивления. Его естественно назвать эквивалентным сопротивлением гибридного ВЧ разряда. Также как в случае чисто индуктивного разряда эквивалентное сопротивление гибридного разряда является мерой способности плазмы поглощать ВЧ мощность.

Необходимо отметить, что в отличие от чисто индуктивного разряда эквивалентное сопротивление плазмы гибридного разряда зависит не только от закономерностей проникновения ВЧ полей в плазму и механизма поглощения мощности, но и от параметров внешней цепи разряда [4]. Последнее физически связано с тем, что параметры внешней цепи (реактивные сопротивления антенны и разделительной емкости) существенно

влияют на относительную роль каждого из каналов в поддержании гибридного разряда.

2. Баланс мощности во внешней цепи гибридного ВЧ разряда

В условиях, когда нагрузка согласована с генератором, активная ВЧ мощность P_{gen} , отдаваемая генератором во внешнюю цепь гибридного ВЧ разряда, также как в случае чисто индуктивного ВЧ разряда, распределяется между двумя активными нагрузками, а именно часть мощности идет на нагрев индуктора, а часть мощности поглощается плазмой:

$$P_{\text{gen}} = \frac{1}{2} (R_{\text{ant}} + R_{\text{pl}}^h) \cdot I_i^2,$$

где R_{ant} — активное сопротивление индуктора.

В реальных экспериментах значительная часть мощности P_m выделяется в системе согласования, в связи с этим выражение для баланса мощности принимает вид

$$P_{\text{gen}} - P_m = \frac{1}{2} (R_{\text{ant}} + R_{\text{pl}}^h) \cdot I_i^2. \quad (2)$$

3. Схема эксперимента

В эксперименте источник плазмы представлял собой стеклянный цилиндр диаметром и длиной 15 см, расположенный между двумя диэлектрическими фланцами. В нижнем фланце были выполнены отверстия, позволяющие откачивать объем источника плазмы до давления 0.1 мТор. На нижнем фланце также был смонтирован газоввод, позволяющий осуществлять напуск рабочего газа в объем источника плазмы. Для возбуждения и поддержания разряда в источниках плазмы использовались спиральные антенны, закрепленные на боковой поверхности источников плазмы. Дополнительно к спирали на нижнем и верхнем фланцах размещались обкладки конденсатора внутри источника плазмы. Обкладка конденсатора, расположенная на нижнем фланце, была заземлена. Антenna и обкладки конденсатора подключались параллельно к одному ВЧ генератору. В цепь емкостного канала подключался разделительный конденсатор емкостью 100 пФ. Использовался ВЧ генератор, работающий на частоте 13.56 МГц. Диапазон изменения мощности ВЧ генератора составлял 0–300 Вт.

Для контроля параметров плазмы в центре источника плазмы на его оси располагался цилиндрический зонд. В процессе экспериментов измерялась величина ионного тока насыщения. Параллельно измерялась интенсивность свечения плазмы.

ВЧ мощность, поглощенная плазмой, определялась как разность между мощностью, отдаваемой ВЧ генератором во внешнюю цепь, и потерями мощности в системе согласования и антенне.

Потери мощности в системе согласования P_m при отсутствии потерь мощности в индукторе, следуя [5], можно определить по формуле

$$P_m = \frac{U^2}{R_m},$$

где R_m — эффективное сопротивление, определяющее потери мощности в системе согласования. Величину

R_m легко определить, измеряя U_0 и мощность ВЧ генератора P_{gen}^0 без разряда. В этом случае естественно приравнять P_m и P_{gen}^0 :

$$R_m = \frac{U_0^2}{P_{\text{gen}}^0}.$$

Таким образом, при наличии разряда потери мощности в системе согласования можно определить по формуле

$$P_m = \left(\frac{U}{U_0} \right)^2 P_{\text{gen}}^0.$$

В гибридном ВЧ разряде, однако, мощность теряется еще и при нагреве индуктора. В связи с этим корректный учет потерь мощности во внешней цепи разряда требует сначала определения R_m при использовании только емкостной цепи разряда, а затем R_{ant} с помощью стандартной процедуры [3], где вместо значений P_{gen}^0 используются величины $P_{\text{gen}}^0 - P_m$.

Для определения величины ВЧ мощности, поглощенной плазмой, с помощью емкостного делителя измерялось напряжение, подводимое к антенне и конденсатору при конкретных условиях эксперимента и без разряда.

Для определения доли мощности, поступающей в разряд через емкостной канал, с помощью осциллографа TDS-1012 измерялись временные зависимости напряжения между электродами конденсатора и ВЧ тока в емкостном канале. Произведение измеренных величин затем интегрировалось.

Эквивалентное сопротивление плазмы гибридного разряда R_{pl}^h определялось на основании формулы (2) по известным P_{gen} , R_m и R_{ant} .

Измерения проводились в разряде в аргоне в диапазоне давлений $10 \text{ мТор} < p < 100 \text{ мТор}$.

4. Результаты

На рис. 2 показаны зависимости эквивалентного сопротивления гибридного разряда, величины P_c и доли мощности P_c/P_{pl} , поступающей в плазму гибридного разряда через емкостной канал, интенсивности свечения плазмы от мощности P_{pl} , вложенной в плазму. Представленные результаты были получены в разряде в аргоне при различных значениях давления газа.

Рассмотрим зависимость R_{pl}^h от P_{pl} . Как видно из рис. 2, а, в области малых значений P_{pl} величины эквивалентного сопротивления падают с ростом мощности, а затем, пройдя через минимум, возрастают по мере роста P_{pl} . Увеличение давления аргона p в исследованном диапазоне приводит к снижению значений эквивалентного сопротивления. Мощность P_c , поступающая в разряд через емкостной канал, сначала возрастает, а затем насыщается с ростом P_{pl} , причем в области насыщения значения P_c слабо зависят от давления аргона. Напротив, в области малых P_{pl} рост давления сопровождается смещением области роста P_c в область меньших значений P_{pl} . Обращает на себя внимание, что область существенного роста интенсивности свечения плазмы, обычно связываемая с переходом разряда из E -в H -моду, при увеличении давления аргона также смещается в область меньших значений P_{pl} . Увеличение

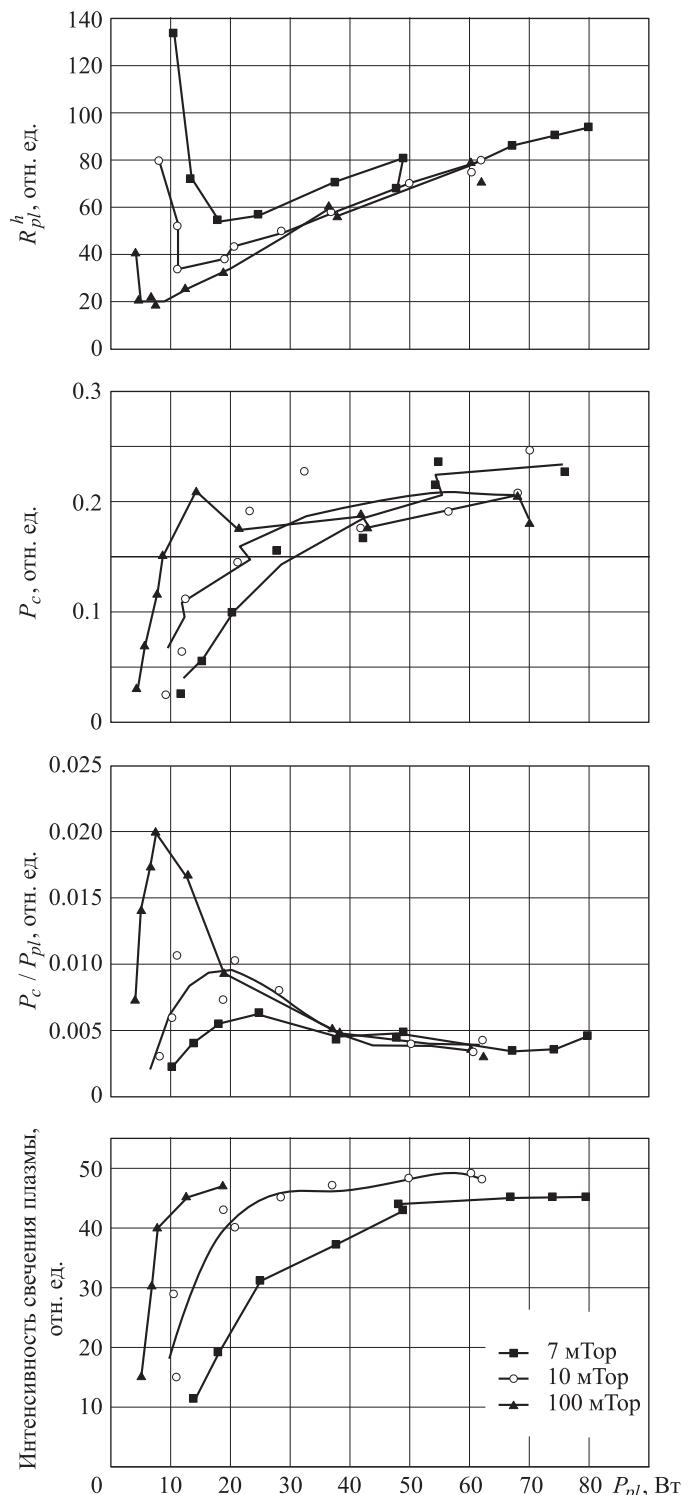


Рис. 2. Зависимость эквивалентного сопротивления гибридного разряда (а), мощности P_c (б) и доли мощности P_c/P_{pl} (в), поступающей в плазму через емкостной канал, интенсивности свечения плазмы (г) от величины мощности, поглощенной плазмой P_{pl}

давления аргона приводит и к росту вклада мощности, поступающей через емкостной канал, в величину полной мощности, поглощенной плазмой (рис. 2, в). Однако, как показали измерения, роль емкостного канала велика в относительно узком интервале мощностей P_{pl} . Неожиданным результатом оказалось падение

отношения P_c/P_{pl} в области совсем малых значений P_{pl} . По-видимому, этот эффект связан с тем, что при малых вложенных мощностях ток, текущий через спиральную antennу, оказывается недостаточным для возбуждения индуктивной моды разряда. При этом ВЧ мощность поступает в плазму через два емкостных канала: первый из них образован обкладками конденсатора, а второй возникает благодаря существованию паразитных емкостей между витками антенны, antennой и плазмой.

5. Обсуждение результатов

Для простоты будем считать, что в условиях эксперимента ВЧ мощность поступает в плазму через индуктивный и емкостной канал независимо, т. е. справедлива эквивалентная схема, показанная на рис. 3. При составлении эквивалентной схемы индуктивная ветвь разряда, так же как в чисто индуктивном разряде, была представлена в виде последовательно соединенных активного сопротивления антены R_{ant} , эквивалентного сопротивления плазмы R_{pl}^i , индуктивности антены L_{ant} и эквивалентной индуктивности плазмы L_{pl}^i . Емкостная ветвь разряда была представлена в виде последовательно соединенных разделительной емкости C , емкостей C_{sh} , моделирующих емкость приэлектродных слоев пространственного заряда и активного сопротивления плазмы R_{pl} . Необходимо подчеркнуть, что в случае гибридного разряда значения R_{pl}^i , R_{pl} определяются одним и тем же набором параметров плазмы: концентрацией n_e и энергетическим распределением электронов $f(\varepsilon)$, давлением аргона p и т. д.

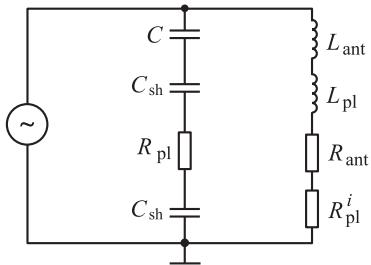


Рис. 3. Упрощенная эквивалентная схема гибридного ВЧ разряда

Очевидно, что при сделанных предположениях величина ВЧ мощности, поглощаемая плазмой, определяется выражением

$$P_{pl} = \frac{1}{2} (I_i^2 R_{pl}^i + I_c^2 R_{pl}) = \frac{1}{2} I_i^2 \left(R_{pl}^i + \frac{Z_i^2}{Z_c^2} R_{pl}^h \right) = \frac{1}{2} I_i^2 R_{pl}^h.$$

Проанализируем поведение эквивалентного сопротивления гибридного разряда R_{pl}^h при изменении концентрации плазмы n_e и давления аргона. Значения R_{pl}^i оценим с помощью теоретических формул [6], а значения R_{pl} — на основании формулы, определяющей проводимость плазмы [3]:

$$R_{pl} = \frac{m(\omega^2 + \nu^2)}{e^2 n_e \nu} \frac{l}{2\pi r},$$

где e , m — заряд и масса электрона, ω — рабочая частота, ν — частота столкновений электронов с тяже-

лыми частицами, l и r — длина и радиус источника плазмы.

Рассчитанные зависимости R_{pl}^i , R_{pl} от плотности плазмы n_e для давлений аргона 1, 10 и 100 мТор показаны на рис. 4. Как видно из рисунка, значения R_{pl}^i в области плотностей плазмы $n_e \leq 10^{11} \text{ см}^{-3}$ возрастают с плотностью плазмы, затем, пройдя через максимум, убывают с ростом n_e . Рост давления аргона от 1 до 10 мТор приводит к увеличению значений R_{pl}^i , дальнейший рост давления аргона до 100 мТор сопровождается понижением R_{pl}^i при $n_e \leq 10^{11} \text{ см}^{-3}$. Значения R_{pl} монотонно убывают с ростом плотности плазмы и растут с увеличением давления аргона.

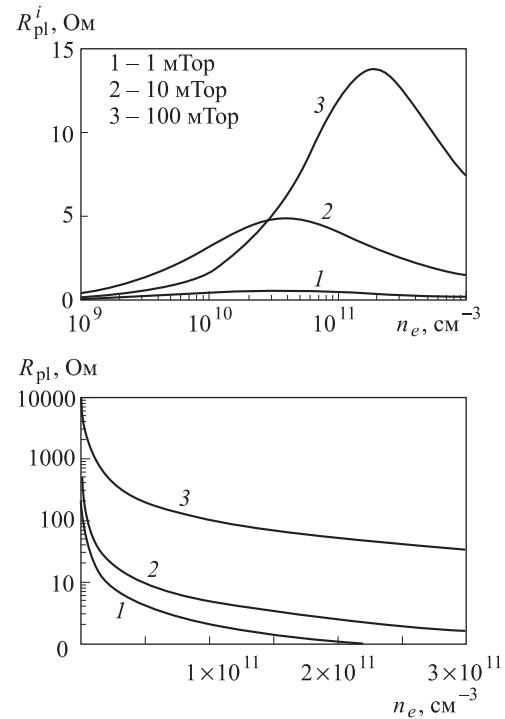


Рис. 4. Расчетная зависимость R_{pl}^i (а), и R_{pl} (б) от концентрации электронов

При оценке R_{pl}^h будем считать для простоты, что импеданс индуктивной ветви разряда определяется индуктивным сопротивлением антены и составляет величину 600 Ом. Емкостное сопротивление слоев пространственного заряда примем равным 1000 Ом, что близко к значениям, полученным в [7].

Напомним, что в эксперименте определялись зависимости эквивалентного сопротивления гибридного разряда от мощности, поглощенной плазмой. Для сравнения поведения расчетных R_{pl}^h с экспериментом предполагалось, так же как и при исследовании индуктивного ВЧ разряда, что плотность плазмы пропорциональна P_{pl} . Коэффициент пропорциональности находился на основании простой физической модели разряда, изложенной в [4].

На рис. 5 показаны рассчитанные зависимости эквивалентного сопротивления чисто индуктивного и гибридного разрядов от P_{pl} для давлений аргона 1, 10 и 100 мТор. Как видно, при минимальном из рассмотренных давлений эквивалентное сопротивление

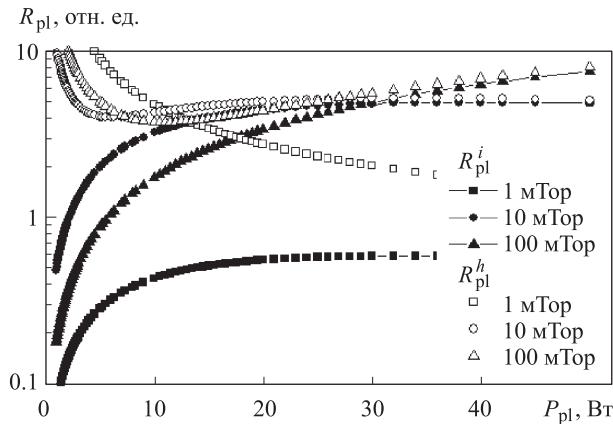


Рис. 5. Расчетная зависимость $R_{\text{пл}}^h$, $R_{\text{пл}}^i$ от величины мощности, поглощенной плазмой $P_{\text{пл}}$

плазмы гибридного разряда определяется поглощением ВЧ мощности, поступающей в разряд через емкостной канал, причем $R_{\text{пл}}^h$ монотонно убывает с ростом мощности, поступающей в плазму. При давлениях 10 мТор и выше $R_{\text{пл}}^h$ немонотонно зависит от $P_{\text{пл}}$: при малых значениях вложенной ВЧ мощности $P_{\text{пл}}$ значения $R_{\text{пл}}^h$ определяются емкостной составляющей разряда, они убывают с ростом $P_{\text{пл}}$. По мере роста $P_{\text{пл}}$ возрастает роль индуктивного канала разряда, которая становится определяющей при $P_{\text{пл}} \geq 20$ Вт. Здесь эквивалентное сопротивление возрастает с увеличением $P_{\text{пл}}$.

Сравнение результатов расчета с экспериментом позволяет сделать вывод, что наблюдавшееся в экспериментах уменьшение эквивалентного сопротивления с области малых вложенных мощностей связано с пре-валирующим вкладом емкостного канала в поглощение

ВЧ мощности. Роль емкостного канала тем выше, чем выше давление аргона. В области $P_{\text{пл}} > 20$ Вт основную роль начинает играть индуктивный канал вложения ВЧ мощности, здесь, в согласии с расчетными данными, эквивалентное сопротивление возрастает с ростом $P_{\text{пл}}$.

Заключение

В работе рассмотрены закономерности вложения ВЧ мощности в плазму гибридного ВЧ разряда при изменении величины вложенной мощности и давления аргона. Обнаружена немонотонная зависимость эквивалентного сопротивления гибридного разряда от величины ВЧ мощности, поглощенной плазмой, связанная с перераспределением вклада емкостного и индуктивного каналов в поглощение ВЧ мощности. Рост давления аргона приводит к росту роли емкостного канала при малых значениях $P_{\text{пл}}$.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 09-02-01371-а)

Список литературы

- Кралькина Е.А. // УФН. 2008. **178**, № 5. С. 519.
- Ковалевский В.Л., Савинов В.П. // Физика плазмы. 1994. **20**, № 3. С. 322.
- Гинзбург В.Л., Рухадзе А.А. // Волны в магнитоактивной плазме. М., 1970.
- Александров А.Ф., Бугров Г.Э., Вавилин К.В. и др. // Физика плазмы. 2004. **30**, № 5. С. 434.
- Godyak V.A., Piejak R.B. // J. Vac. Sci. Technol. 1990. **A8(5)**. Р. 3833.
- Вавилин К.В., Рухадзе А.А., Ру М.Х., Плаксин В.Ю. // Физика плазмы. 2004. **30**, № 8. С. 739.
- Александров А.Ф. и др. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2010. № 1. С. 43.

Experimental study of the energy input mechanism to the hybrid RF low pressure discharge under change of RF generator power and argon pressure

A. F. Alexandrov, K. V. Vavilin, E. A. Kral'kina^a, V. B. Pavlov, A. A. Rukhadze, V. P. Savinov^b, Chen Zhao, V. G. Yakunin

Department of Physical Electronics, Faculty of Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.

E-mail: ^aekralkina@mail.ru, ^bsavinov1983@yahoo.com.

The experimental study of the energy input mechanism to the new modification of RF discharge, i.e. hybrid discharge sustained by both potential and vertical RF electrical fields, is presented. The connected in parallel spiral inductor and electrodes of capacitor form the RF power input unit organising the discharge. The data obtained under study of the influence of the RF power value coupled to plasma as well as argon pressure on the equivalent plasma resistance being the measure of plasma ability to absorb RF power are represented. The role of capacitive channel in the coupled to plasma balance is considered.

Keywords: RF discharge. Hybrid RF discharge, inductive and capacitive channels, near electrode sheaths of spatial charge.

PACS: 52.50.-b, 52.80.Pi, 52.80.-s.

Received 10 January 2010.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 4(2010).

Сведения об авторах

- Александров Андрей Федорович — докт. физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой; e-mail: alex@ph-elec.phys.msu.su.
- Вавилин Константин Викторович — канд. физ.-мат. наук, науч. сотр.; e-mail: viline@inbox.ru.
- Кралькина Елена Александровна — докт. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр.; e-mail: ekralkina@mail.ru.
- Павлов Владимир Борисович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.; e-mail: vb_pavlov@mail.ru.
- Рухадзе Анри Амвросиевич — докт. физ.-мат. наук, профессор; e-mail: rukh@fpl.gpi.ru.
- Савинов Владимир Павлович — докт. физ.-мат. наук, доцент; e-mail: savinov1983@yahoo.com.
- Чжао Чень — аспирант; e-mail: vincentzhao@mail.ru.
- Якунин Валерий Георгиевич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.; e-mail: yvg51@bk.ru.