

Экспериментальное изучение параметров плазмы гибридного ВЧ-разряда низкого давления

К. В. Вавилин, М. А. Гоморев, Е. А. Кралькина^а, П. А. Неклюдова, В. Б. Павлов, Чень Чжао

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра физической электроники. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.
E-mail: ^аekralkina@mail.ru

Статья поступила 06.07.2011, подписана в печать 21.09.2011

Экспериментально изучаются параметры плазмы гибридного ВЧ-разряда, который является новой модификацией ВЧ-разряда. Разряд поддерживается как вихревым, так и потенциальным ВЧ-электрическими полями. Для организации гибридного ВЧ-разряда в настоящей работе используется узел ввода ВЧ-мощности в виде параллельно соединенных индуктора и обкладок конденсатора. В емкостной канал разряда включена разделительная емкость. В работе представлены данные, полученные при изучении влияния величины мощности, поступающей в плазму, давления аргона и величины разделительной емкости на параметры плазмы разряда, такие как энергетическое распределение, температура и концентрация электронов, потенциал плазмы. Рассмотрена роль емкостного канала в изменении свойств и параметров разряда.

Ключевые слова: ВЧ-разряд, гибридный ВЧ-разряд, индуктивные и емкостные каналы разряда, энергетическое распределение электронов, концентрация электронов, эффективная температура электронов.

УДК: 537.32. PACS: 52.50.-b, 52.80.Pi, 52.80.-s.

Введение

В настоящее время высокочастотный (ВЧ) разряд низкого давления широко применяется в промышленных плазменных технологиях. Хорошо известны источники плазмы, основанные на индуктивном и емкостном ВЧ-разряде [1–4]. Для индуктивного ВЧ-разряда низкого давления характерны высокие плотности электронов при относительно низких эффективных температурах электронов. Для емкостного разряда, напротив, характерны относительно низкие плотности плазмы и наличие быстрых электронов. В работах [5–7] представлены первые результаты по изучению новой модификации ВЧ-разряда — гибридного ВЧ-разряда, возбуждение которого осуществляется как индуктивным, так и емкостным способами. В работе [7] показано, что изменение мощности ВЧ-генератора и параметров внешней цепи разряда позволяет изменять долю мощности, поступающую в разряд через индуктивный и емкостной каналы. Это должно привести к изменению параметров плазмы разряда. Цель настоящей работы, являющейся естественным продолжением работы [7], состоит в изучении динамики параметров плазмы гибридного ВЧ-разряда низкого давления при изменении доли ВЧ-мощности, поступающей через емкостной канал.

1. Экспериментальная установка и методика измерений

Экспериментальная установка подробно описана в работах [7, 8].

Гибридный ВЧ-разряд поджигался в цилиндрическом источнике плазмы, диаметр и высота которого составляли 15 см. Так же как в работе [7], узел ввода ВЧ-мощности был выполнен в виде параллельно соединенных спиральной антенны и обкладок конденсатора, расположенных на боковой и торцевых поверхностях источника плазмы соответственно. Между антенной

и обкладками конденсатора была включена разделительная емкость C . Значения C изменялись в диапазоне 10–300 пФ.

В ряде случаев параметры гибридного ВЧ-разряда сравнивались с соответствующими величинами, измеренными в емкостном и индуктивном ВЧ-разрядах. Геометрические размеры электродов и индуктора были такими же, как в случае гибридного ВЧ-разряда.

Узел ввода ВЧ-мощности через систему согласования подсоединялся к ВЧ-генератору «Cesar 1310» с рабочей частотой 13.6 МГц и плавно изменяемой мощностью в диапазоне 0–1000 Вт. Измерения проводились в аргоне в диапазоне давления 7–100 мторр. Внутренние параметры плазмы гибридного ВЧ-разряда изучались с помощью зондовой и спектральных методик.

Для измерения потенциала плазмы, концентрации и энергетического распределения электронов проводилось зондирование плазмы с помощью зонда Ленгмюра. Зонды представляли собой остеклованные вольфрамовые проволоки диаметром 0.3 мм с длиной рабочей поверхности 5 мм. Зонд был установлен в центральном сечении источника плазмы вблизи оси источника.

При проведении зондовых измерений использовалась стандартная электрическая схема [8]. Для подавления ВЧ-составляющих зондового тока, искажающих измеряемую кривую при работе с ВЧ-разрядами, использовались резонансные фильтры, имевшие высокое сопротивление на первой ($\Phi 1$) и второй ($\Phi 2$) гармониках рабочей частоты. Результаты измерений поступали на АЦП, встроенный в компьютер [8].

Функция распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ) находилась непосредственно из решения интегрального уравнения

$$i_e(V) = \frac{n_e e S}{2\sqrt{2m}} \int_{eV}^{\infty} \frac{\varepsilon - eV}{\sqrt{\varepsilon}} f(\varepsilon) d\varepsilon, \quad (1)$$

связывающего электронный ток на зонд с ФРЭЭ [9] с помощью метода регуляризации А.Н. Тихонова [10, 11]. Здесь V — потенциал зонда, e — заряд электрона, S — площадь зонда, n_e — концентрация электронов, m — масса электронов.

Одновременно с зондовыми измерениями регистрировалась интенсивность свечения плазмы. Спектральные измерения преследовали две цели:

- 1) оценку эффективной температуры электронов по отношению интенсивностей спектральных линий;
- 2) определение пространственного распределения параметров плазмы на основании измерений пространственного распределения интенсивности свечения плазмы.

Для измерения интенсивности свечения плазмы [8] ее излучение с помощью световода попадало на входную щель монохроматора МДР-23, ширина входной и выходной щелей которого составляла 50 мкм. На выходе монохроматора был установлен фотоэлектронный умножитель ФЭУ-100. Сигнал с выхода фотоумножителя регистрировался с помощью платы АЦП, встроенной в компьютер. Сканирование спектра проводилось в диапазоне 3500–7500 Å.

Эффективная температура быстрых электронов определялась по отношению интенсивности спектральных линий ArI 4198 Å и 4200 Å, используя метод, описанный в работе [8].

Продольное распределение интенсивности свечения плазмы измерялось при перемещении световода по длине источника плазмы. При этом на входную щель монохроматора поступало излучение, усредненное по длине, равной 1.5 см.

2. Результаты экспериментов

Как известно [12], спектр свечения плазмы несет в себе богатую информацию об энергетическом распределении быстрых электронов. В связи с этим на первом этапе работы было выполнено сравнение спектра свечения гибридного разряда со спектрами свечения емкостного и индуктивного ВЧ-разрядов. На рис. 1 показаны продольные распределения отношения интенсивности ионных и атомарных линий аргона η , измеренных в различных формах ВЧ-разряда.

Как и следовало ожидать, η достигает максимальных значений в емкостном разряде, где существует избыток быстрых электронов, возникающих при торможении электронных пучков, формирующихся в приэлектродных слоях пространственного заряда [4, 13]. Механизм рождения быстрых электронов проявляет себя в росте отношения η при приближении к электродам, к которым подводится ВЧ-напряжение.

Наименьшие значения η характерны для индуктивного ВЧ-разряда, где существует дефицит быстрых электронов, вызванный неупругими столкновениями электронов с атомами аргона [14].

Значения η в случае гибридного разряда занимают промежуточные значения между величинами, характерными для индуктивного и емкостного ВЧ-разряда. В случае разделительной емкости 13 пФ рост отношения интенсивностей линий ArII/ArI, характеризующий рост числа быстрых электронов, наблюдается только у пассивного электрода, у активного электрода

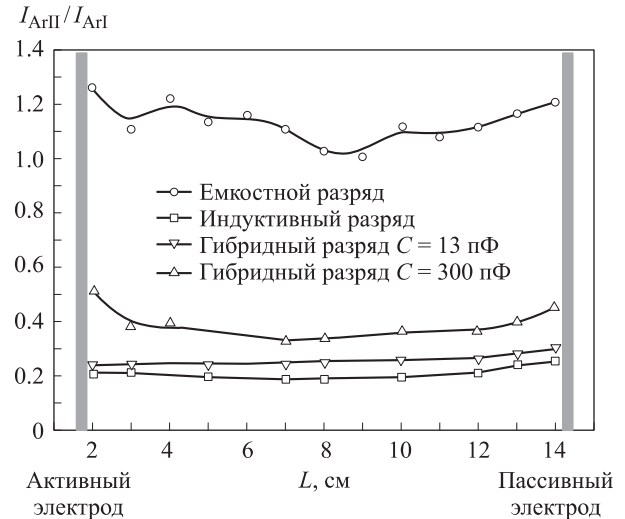


Рис. 1. Пространственные распределения отношения интенсивности ионных и атомарных линий аргона, измеренных в различных формах ВЧ-разряда. Давление аргона 7 мторр

значения η близки к существующим в основном объеме разряда. При значениях $C = 300$ пФ значения η увеличиваются, причем рост η наблюдается как у пассивного, так и у активного электродов, что свидетельствует о формировании слоев пространственного заряда у обоих электродов. Таким образом, можно видеть, что изменение разделительной емкости приводит к существенным изменениям свойств разряда.

Рассмотрим более внимательно результаты спектральных измерений, выполненных при изучении гибридного ВЧ-разряда. На рис. 2 показана динамика пространственного распределения эффективной температуры быстрых электронов T_e^* , определенной по отношению интенсивностей линий при различных значениях вложенной в плазму мощности P_{pl} .

Напомним, что в соответствии с результатами работы [7], при $C = 20$ пФ и $P_{pl} \leq 30$ Вт основной вклад мощности в разряд идет через емкостной канал. Как видно, при указанных значениях P_{pl} эффективная температура электронов увеличивается вблизи как активного, так и пассивного электродов. Это связано с формированием приэлектродных слоев объемного заряда, где формируются пучки быстрых электронов. При мощностях $P_{pl} \geq 30$ Вт картина изменяется. Теперь только у пассивного электрода наблюдается рост эффективной температуры быстрых электронов, вблизи активного электрода T_e^* близка к температуре быстрых электронов в основном объеме плазмы. Эффект сохраняется вплоть до значений разделительной емкости $C = 50$ пФ.

Рис. 2 показывает, что в основном объеме плазмы эффективная температура быстрых электронов постоянна в пределах погрешности эксперимента. В связи с этим в дальнейшем изучались закономерности изменения интенсивности свечения плазмы в центральном сечении источника плазмы.

На рис. 3 показана динамика эффективной температуры электронов при изменении величины ВЧ-мощности, вложенной в плазму, при различных значениях

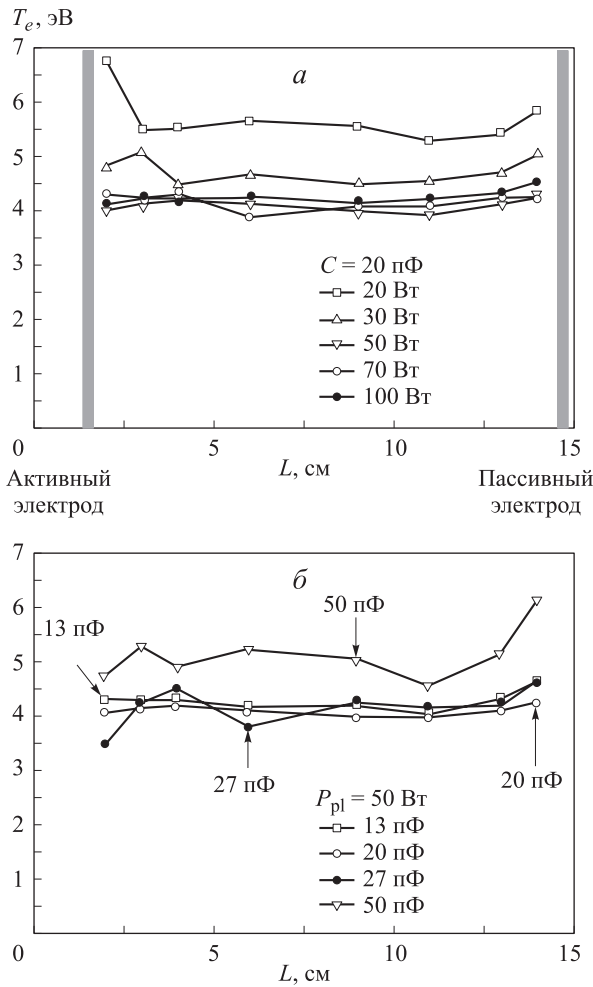


Рис. 2. Распределение эффективной температуры быстрых электронов по длине источника плазмы при различных значениях ВЧ-мощности, вложенной в плазму (а) и различных величинах разделительной емкости (б)

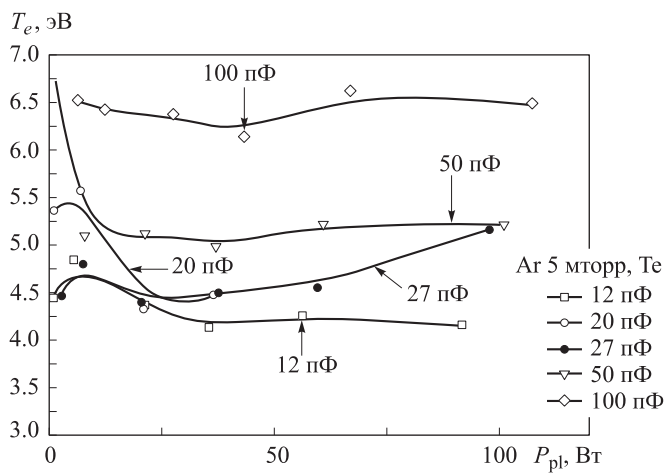


Рис. 3. Зависимость эффективной температуры быстрых электронов от величины ВЧ-мощности, вложенной в плазму, при различных величинах разделительной емкости

тронов возрастает. Здесь основная мощность вкладывается в плазму через емкостной канал [7]. В области $10 \text{ Вт} \leq P_{\text{pl}} \leq 30 \text{ Вт}$ происходит переход от емкостной моды разряда к моде, в которой преобладает вклад ВЧ-мощности через индуктивный канал. Здесь наблюдается падение эффективной температуры быстрых электронов. При $P_{\text{pl}} \geq 30 \text{ Вт}$ эффективная температура быстрых электронов практически не зависит от вложенной мощности. Здесь, как показали результаты работы [7], соотношение между мощностями, поступающими в разряд через индуктивный и емкостной каналы, неизменно. Рост разделительной емкости, сопровождающийся увеличением доли мощности, поступающей через емкостной канал, приводит к увеличению T_e^* при всех рассмотренных значениях P_{pl} .

Спектральные измерения позволяют проанализировать поведение только группы быстрых электронов. В связи с этим они были дополнены зондовыми измерениями, выполненными при $P_{\text{pl}} > 30 \text{ Вт}$. Спектральные измерения (см. рис. 2) показали высокую однородность плазмы гибридного разряда. В связи с этим можно считать, что энергетические распределения электронов, определенные на основании ВАХ зонда, расположенного вблизи оси источника плазмы в центральном сечении, характерны для всего плазменного объема. Зондовые измерения были выполнены при значениях разделительной емкости, не превышающих 50 пФ. При более высоких значениях C вклад ВЧ-составляющей в зондовый ток возрастал, что приводило к значительным искажениям зондовых характеристик.

Энергетические распределения электронов, рассчитанные на основании измеренных зондовых характеристик, показаны на рис. 4. Отметим, что применение метода регуляризации А. Н. Тихонова для определения ФРЭЭ позволило определить энергетическое распределение в более широком диапазоне энергий, чем область задания электронного тока на зонд [11].

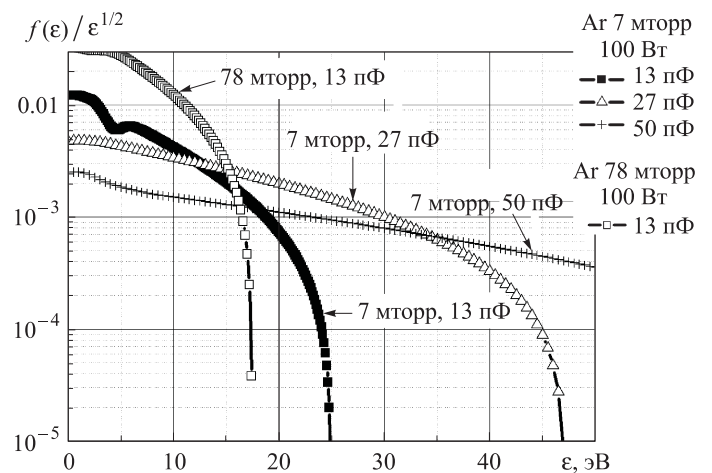


Рис. 4. Энергетические распределения электронов, полученные при различных значениях разделительной емкости

Рис. 4 показывает, что энергетическое распределение электронов, представленное в полулогарифмическом масштабе, имеет три линейных участка, т. е. в области низких, средних и относительно высоких энергий электронов энергетическое распределение электро-

емкости разделительного конденсатора. Как видно, можно выделить три области P_{pl} . При значениях $P_{\text{pl}} \leq 10 \text{ Вт}$ эффективная температура быстрых элект-

нов близко к максвелловскому. Аналогичный результат был получен в [14] при исследовании индуктивного ВЧ-разряда без магнитного поля. Однако, как видно из рис. 4, группа медленных электронов при $C > 13$ пФ выражена менее отчетливо, чем у энергетических распределений, представленных в работе [14]. Это может быть связано с паразитным влиянием ВЧ-составляющей зондового тока.

Надо отметить, что «наклон» энергетического распределения в области энергий электронов, принадлежащих области неупругих столкновений с атомами аргона, выше, чем в области малых и средних энергий электронов, т. е. «температура» $T_e f^*$ быстрой группы электронов меньше, чем «температура» двух других групп электронов. Это можно объяснить влиянием неупругих столкновений с атомами аргона.

На рис. 5 просуммированы результаты, полученные зондовым методом. Температура электронов, представленная на рис. 5, б, определялась по наклону зондовой кривой вблизи потенциала пространства. Она близка к «температуре» средней группы электронов. Можно видеть, что рост мощности ВЧ-генератора и давления аргона сопровождаются ростом концентрации и падением температуры электронов. При этом «температуры» средней и быстрой групп электронов приближаются друг к другу (см. рис. 4) Это является следствием максвеллизации электронов при увеличении плотности плазмы.

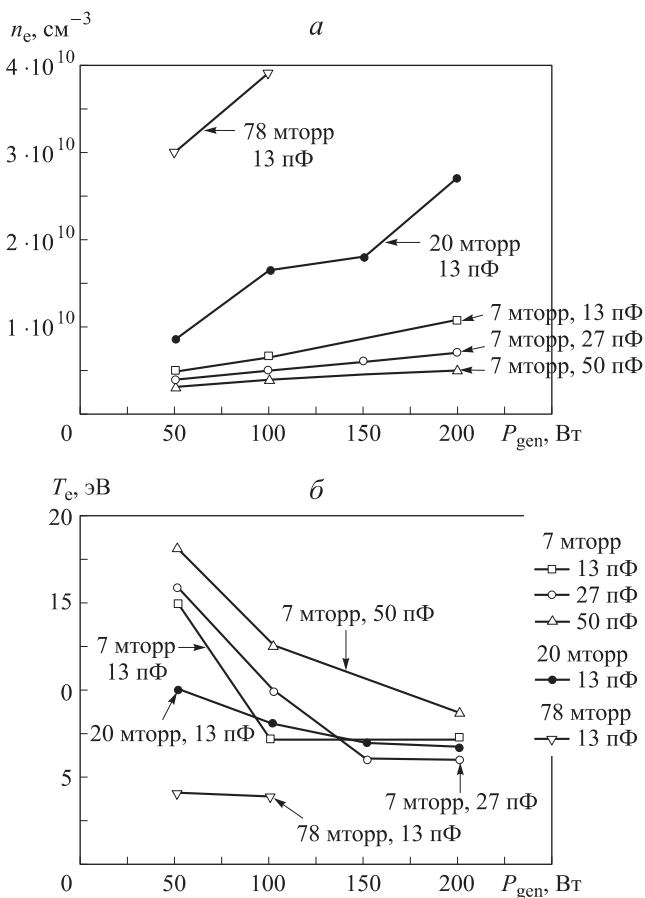


Рис. 5. Зависимость концентрации (а) и температуры электронов, определенной по наклону зондовой кривой (б), от мощности ВЧ-генератора

В согласии с результатами спектральных измерений зондирование плазмы показало, что с ростом разделительной емкости концентрация электронов падает, а эффективная температура растет, однако количественно T_e^* , определенная на основании спектральных измерений, ниже. Это подтверждает ранее сделанный вывод о наличии дефицита быстрых электронов в разряде.

Зондовые измерения выявили еще одну интересную зависимость. В работе были выполнены измерения плавающего потенциала зонда относительно пассивного и активного электродов в емкостном и гибридном ВЧ-разрядах. Плавающий потенциал зонда в емкостном разряде, как и следовало ожидать, оказался положительным как относительно пассивного, так и относительно активного электрода, причем абсолютная величина разности потенциалов между зондом и активным электродом была существенно выше. В случае гибридного разряда ситуация оказалась иной. Только при $C = 100$ пФ плавающий потенциал зонда был положительным относительно активного электрода. При меньших значениях разделительной емкости с ростом вложенной ВЧ-мощности плавающий потенциал плазмы был ниже потенциала активного электрода. Измерения потенциала пространства, выполненные при $C < 50$ пФ, показали, что потенциал активного электрода в гибридном ВЧ-разряде положителен относительно плазмы.

Напомним, что при проведении спектральных измерений было обнаружено, что эффективная температура быстрых электронов, отношение интенсивности ионной и атомарных линий при $C \leq 50$ пФ увеличиваются только при приближении к пассивному электроду, свидетельствуя о формировании приэлектродного слоя пространственного заряда. Вблизи активного электрода увеличения T_e^* не наблюдалось. Это косвенно подтверждает результаты, полученные с помощью зондов.

Заключение

В работе рассмотрено поведение параметров плазмы гибридного ВЧ-разряда при изменении величины вложенной мощности, давления аргона и величины разделительной емкости. Показано, что повышение доли мощности, поступающей в разряд через емкостной канал, при уменьшении мощности ВЧ-генератора и увеличении величины разделительной емкости приводит к росту эффективной температуры электронов и понижению концентрации плазмы. Изменение величины разделительной емкости позволяет управлять параметрами гибридного разряда, плавно приближая его свойства либо к емкостному, либо к индуктивному ВЧ-разряду. Потенциал активного электрода в гибридном ВЧ-разряде при малых разделительных емкостях положителен относительно плазмы.

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

Список литературы

1. *Tsuboi H., Itoh M., Hayashi T., Uchiba T.* // Japan J. Appl. Phys. 1995. **33**. P. 2476.
2. High density plasma sources / Ed. by O. A. Popov. 1996.

3. *Lieberman M.A., Lichtenberg A.J.* Principles of Plasma Discharges and Materials Processing. N. Y., 2005.
4. *Райзер Ю.П., Шнейдер М.Н., Яценко Н.А.* Емкостной высокочастотный разряд. М., 1995.
5. *Александров А.Ф., Вавилин К.В., Кралькина Е.А.* и др. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2010. № 4. С. 71.
6. *Александров А.Ф., Вавилин К.В., Кралькина Е.А.* и др. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2010. № 1. С. 43.
7. *Вавилин К.В., Гоморев М.А., Кралькина Е.А.* и др. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2012. № 1. С. 97.
8. *Александров А.Ф., Вавилин К.В., Кралькина Е.А.* и др. // Физика плазмы. 2007. **33**, № 9. С. 802.
9. *Чен. Ф.* Диагностика плазмы / Под ред. Р. Хаддлстоуна, С. Леонарда. М., 1967.
10. *Тихонов А.Н., Арсенин В.Я.* Методы решения некорректных задач. М., 1974.
11. *Волкова Л.М., Девятов А.М., Меченов А.С.* и др. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1975. № 3. С. 371.
12. *Волкова Л.М., Девятов А.М., Кралькина Е.А.* и др. // Изв. Сиб. отд. АН СССР. Сер. техн. наук. 1978. **3**, № 1. С. 56.
13. *Савинов В.П.* Граничные эффекты емкостного высокочастотного разряда: Автореф. дисс. ... докт. физ.-мат. наук. М.: 2002.
14. *Godyak V.A., Piejak R.B., Alexandrovich B.M.* // Plasma Sources Sci. Technol. 2002. **11**. P. 525.

Experimental study of the plasma parameters of the hybrid RF low pressure discharge

K. V. Vavilin, M. A. Gomorev, E. A. Kralkina^a, P. A. Nekludova, V. B. Pavlov, Chen Zhao

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

E-mail: ^aekralkina@mail.ru.

The paper presents the experimental study of the plasma parameters of the hybrid discharge being the new modification of the RF discharge. It is sustained by both potential and vortex RF electrical fields. The connected in parallel spiral inductor and electrodes of capacitor form the RF power input unit to the discharge. The disjunctive capacitor is included to the capacitive channel of the discharge. The paper presents the data obtained under study of the influence of the RF power value coupled to plasma, argon pressure and disjunctive capacitor value on the plasma parameters, i. e., electron energy energetic distribution, electron density and plasma potential. The role of capacitive channel in variations of properties and characteristics of the discharge is considered.

Keywords: RF discharge, hybrid RF discharge, inductive and capacitive channels, electron energy distribution, electron density, effective temperature of electrons.

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

Received 6 July 2011.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 1(2012).

Сведения об авторах

1. Вавилин Константин Викторович — канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник; e-mail: viline@inbox.ru.
2. Гоморев Михаил Алексеевич — вед. инженер; e-mail: bugan707@mail.ru.
3. Кралькина Елена Александровна — докт. физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник; e-mail: ekralkina@mail.ru.
4. Неклюдова Полина Алексеевна — аспирантка; e-mail: queep_555@mail.ru.
5. Павлов Владимир Борисович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: vb_pavlov@mail.ru.
6. Чжао Чень — аспирант; e-mail: vincentzhao@mail.ru.