

ХИМИЧЕСКАЯ ФИЗИКА, ФИЗИЧЕСКАЯ КИНЕТИКА И ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

Влияние внешних параметров на особенности высокочастотного гибридного разряда низкого давленияК. В. Вавилин, М. А. Гоморев, Е. А. Кралькина^а, П. А. Неклюдова, В. Б. Павлов, Чень Чжао

*Московский 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 закономерности энерговклада в плазму гибридного ВЧ-разряда с узлом ввода ВЧ-мощности в виде параллельно соединенных спиральной антенны и обкладок конденсатора. Показано, что при малых значениях мощности ВЧ-генератора ВЧ-мощность поступает в гибридный разряд главным образом через емкостной канал, затем по мере роста мощности ВЧ-генератора роль индуктивного канала возрастает. Вклад индуктивного канала тем больше, чем меньше величина разделительной емкости, включенной в емкостную цепь разряда.

Ключевые слова: ВЧ-разряд, гибридный ВЧ-разряд, индуктивные и емкостные каналы разряда, эквивалентное сопротивление, импеданс.

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

Введение

Дискуссия о роли емкостной и индуктивной составляющих в поддержании индуктивного ВЧ-разряда имеет длительную историю [1–4]. Значительный вклад в развитие современных представлений о природе разряда внесли К. Мак-Кинтон и Г. И. Бабат, показавшие существование двух, а именно E - и H -мод индуктивного разряда, где энерговклад в разряд преимущественно происходит через емкостной и индуктивный каналы соответственно. Как правило [5, 6], при практическом использовании H -моды индуктивного ВЧ-разряда авторы стремятся уменьшить емкостную составляющую разряда, наличие которой, по их мнению, ухудшает характеристики разрабатываемых устройств.

В работах [7, 8] было показано, что при горении разряда в E -моду часть ВЧ-мощности поступает в плазму через индуктивный канал, а при горении в H -моду часть ВЧ-мощности поступает в разряд через емкостной канал, причем величина энерговклада через один канал влияет на энерговклад через другой канал. Так, усиление емкостной составляющей разряда приводит к увеличению доли мощности, поступающей в разряд через индуктивный канал, и смещению области перехода из E - в H -моду, в область меньших значений ВЧ-мощности. В свою очередь индуктивный канал разряда влияет на величины квазистационарных приэлектродных скачков потенциала, в значительной степени определяющих свойства емкостного канала разряда.

Вывод о взаимном влиянии индуктивного и емкостного каналов на долю ВЧ-мощности, поступающую в плазму, был получен в работах [7, 8] при исследовании индуктивного ВЧ-разряда с усиленной емкостной компонентой. Необходимо подчеркнуть, что мощность от двух ВЧ-генераторов поступала в плазму через индуктивный и емкостной каналы независимо друг от друга. Естественным продолжением выполненных ранее работ [7, 8] является организация и исследование

гибридного ВЧ-разряда, где индуктивный и емкостной каналы подсоединены параллельно к одному ВЧ-генератору. Изучение физических свойств такого разряда, с одной стороны, позволит уточнить существующие представления о механизмах поджига и горения индуктивного ВЧ-разряда, а с другой — даст возможность выяснить перспективы использования новой модификации ВЧ-разряда, а именно индуктивного ВЧ-разряда с усиленной емкостной составляющей, в качестве рабочей среды плазменных реакторов для технологических применений.

Целью настоящей работы является изучение роли емкостного и индуктивного каналов в поддержании гибридного ВЧ-разряда, изучение закономерностей энерговклада в гибридный ВЧ-разряд при изменении параметров внешней цепи и давления аргона.

Экспериментальная установка и методика измерений

Экспериментальная установка подробно описана в работах [9, 10]. Гибридный ВЧ-разряд поджигался в цилиндрическом источнике плазмы, диаметр и высота которого составляли 15 см. Узел ввода ВЧ-мощности был выполнен в виде параллельно соединенных спиральной антенны и обкладок конденсатора, расположенных на боковой и торцевых поверхностях источника плазмы соответственно (рис. 1). Между антенной и обкладками конденсатора была включена разделительная емкость C , позволяющая регулировать вклад емкостного канала в поддержание разряда. Значения C изменялись в диапазоне 10–300 пФ.

Узел ввода ВЧ-мощности через систему согласования подсоединялся к ВЧ-генератору Cesaг 1310 с рабочей частотой 13.6 МГц и плавно изменяемой мощностью в диапазоне 0–1000 Вт.

В процессе экспериментов измерялись временные зависимости напряжения на выходе из системы согласования V и напряжения V_{dis} , приложенного к электродам

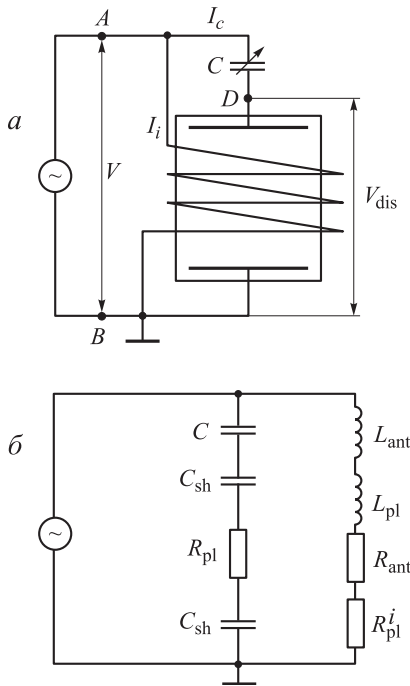


Рис. 1. Схема организации гибридного ВЧ-разряда (а) и его упрощенная эквивалентная схема (б)

емкостного канала (рис. 1). Кроме того, измерялись временные зависимости токов I_i , I_c , текущих через индуктивный и емкостной каналы, а также интенсивность свечения плазмы. По известным значениям V , V_{dis} , I_i и I_c определялись импедансы Z_i , Z_c индуктивного и емкостного каналов, величины ВЧ-мощности P_{pl} , поглощенной плазмой, и P_c , поступающей в плазму через емкостной канал [10]. В работе также рассчитывались значения эквивалентного сопротивления гибридного ВЧ-разряда, характеризующего способность плазмы поглощать ВЧ-мощность, следуя методике, описанной в [10].

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.

Измерения проводились в аргоне в диапазоне давлений 7–100 мторр.

Результаты экспериментов

На рис. 2 показаны зависимости величин V , U , I_i и I_c от мощности, вложенной в плазму P_{pl} при значении разделительной емкости $C = 50$ пФ. Как видно, напряжение на выходе из системы согласования V и ток антенны I_i возрастают с увеличением мощности P_{pl} , причем скорость роста указанных величин замедляется, когда мощность P_{pl} превышает 25 Вт. Эксперименты показали, что рост величины разделительной емкости не приводит к качественным изменениям указанных зависимостей. Рост C сопровождается монотонным падением напряжения и тока антенны. При этом импеданс индуктивного канала постоянен в пределах погрешности эксперимента.

Ток, текущий через емкостной канал, быстро возрастает с увеличением P_{pl} , импеданс емкостного канала

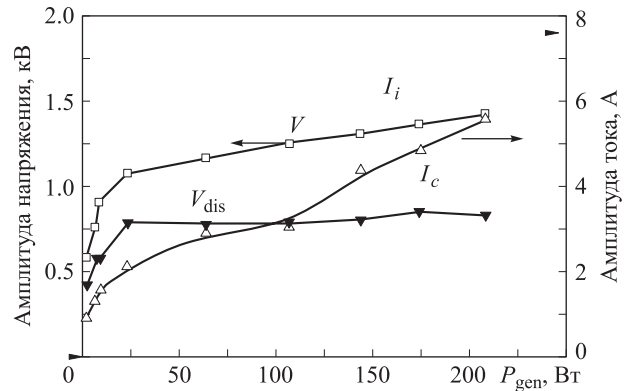


Рис. 2. Зависимость величин V , V_{dis} , I_i и I_c от мощности, вложенной в плазму P_{pl}

падает, а напряжение V_{dis} , приложенное к обкладкам конденсатора, при C менее 50 пФ проходит через максимум при $P_{pl} \sim 25$ Вт, а затем насыщается. При значениях разделительной емкости C более 50 пФ напряжение V_{dis} становится монотонно возрастающей функцией P_{pl} . Необходимо отметить, что абсолютные значения V_{dis} существенно ниже измеренных в чисто емкостном разряде при том же значении разделительной емкости. Рост разделительной емкости приводит к увеличению тока, текущего через емкостной канал, росту импеданса канала и повышению значений V_{dis} .

Известно [11, 12], что в емкостном ВЧ-разряде при наличии разделительной емкости, размыкающей электроды по постоянному току, формируется отрицательное постоянное самосмещение активного электрода относительно заземленного пассивного электрода. Иная картина наблюдалась при изучении самосмещения активного электрода в экспериментах с гибридным ВЧ-разрядом (рис. 3). При разделительной емкости 100 пФ, так же как и в емкостном разряде, самосмещение активного электрода отрицательно, однако величины постоянного потенциала по абсолютной величине существенно ниже, чем в емкостном ВЧ-разряде. При разделительной емкости 50 пФ самосмещение активного электрода отрицательно только при малых вложенных в плазму ВЧ-мощностях. По мере роста P_{pl}

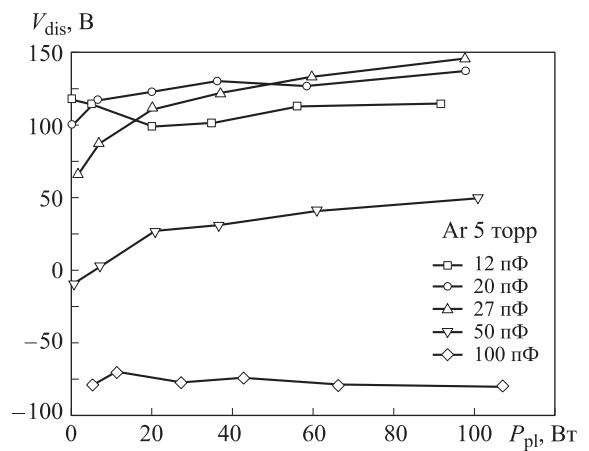


Рис. 3. Зависимость постоянной разности потенциалов между активным и пассивным электродами от мощности, вложенной в плазму при различных значениях разделительной емкости

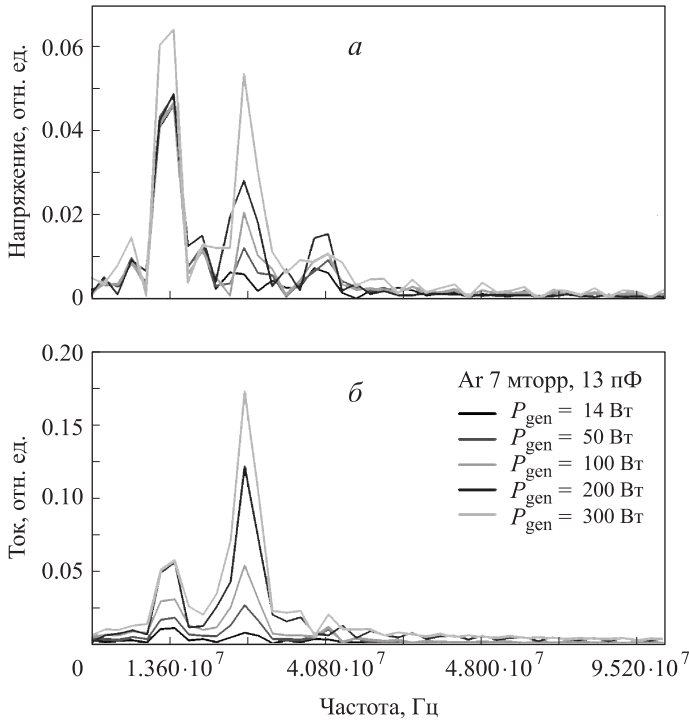


Рис. 4. Спектр напряжения V_{dis} (а) и тока I_c , текущего через емкостной канал (б). $C = 13$ пФ, аргон, 7 мторр

постоянный потенциал активного электрода проходит через нуль и становится положительным. При еще меньших разделительных емкостях постоянный потенциал активного электрода оказался положительным при всех рассмотренных значениях P_{pl} .

Эксперименты выявили существование еще одного интересного эффекта. Генерация высших гармоник тока в приэлектродных слоях пространственного разряда сопровождается при малых значениях разделительного конденсатора (10–30 пФ) появлением высших гармоник в спектре напряжения, подводимого к обкладкам конденсатора, и усилением ангармонизма тока. При $C \sim 10$ пФ оказывается, что основная частота напряжения, приложенного к индуктору, составляет 13.6 МГц, в то время как основная частота напряжения, приложенного к электродам емкостного канала, составляет 27.2 МГц (рис. 4).

На рис. 5 показаны зависимости величин ВЧ-мощности, поступающей в гибридный ВЧ-разряд через емкостной и индуктивный каналы от ВЧ-мощности P_{pl} , вложенной в плазму, при различных значениях разделительной емкости C . Как видно, при небольших значениях P_{pl} основная часть мощности вкладывается в разряд через емкостной канал, затем роль индуктивного канала возрастает и становится преобладающей.

Обозначим величину мощности, при которой энерговклады индуктивного и емкостного каналов в разряд сравниваются, значком P_{pl}^* . Эксперименты показали, что рост величины разделительной емкости C сопровождается увеличением энерговклада через емкостной канал и смещением P_{pl}^* в область больших значений P_{pl} . Изучение закономерностей энерговклада в гибридный ВЧ-разряд при различных давлениях аргона показало, что существует давление (порядка 10–30 мторр), при котором вложение ВЧ-мощности в плазму через

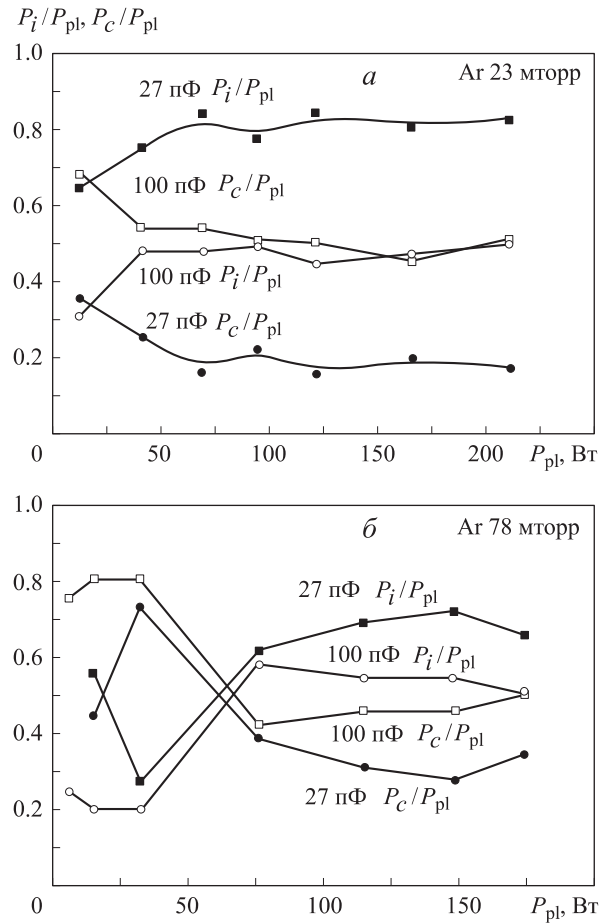


Рис. 5. Зависимость величин ВЧ-мощности, поступающей в гибридный ВЧ-разряд через емкостной и индуктивный каналы от ВЧ-мощности, вложенной в плазму P_{pl} , при различных значениях разделительной емкости C при давлении аргона 23 мторр (а) и 78 мторр (б)

индуктивный канал максимально, а значения P_{pl}^* минимальны. Понижение давления ниже 10 мторр, также как и повышение давления выше 30 мторр сопровождается усилением роли емкостного канала.

Эквивалентное сопротивление плазмы гибридного разряда при значении разделительной емкости 10 пФ при давлениях аргона менее 70 мторр близко к значениям эквивалентного сопротивления индуктивного разряда. Рост давления аргона и величины разделительной емкости в рассмотренных диапазонах сопровождается ростом эквивалентного сопротивления гибридного ВЧ-разряда. Это связано с увеличением энерговклада в разряд через емкостной канал.

Обсуждение результатов

Проанализируем полученные результаты с помощью упрощенной эквивалентной схемы (см. рис. 1, б), полученной в предположении о независимом вложении ВЧ-мощности в плазму через индуктивный и емкостной каналы. Индуктивная ветвь разряда формируется активным сопротивлением и индуктивностью антенны, эквивалентными сопротивлением и индуктивностью плазмы. Емкостной канал разряда формируется разделительной емкостью C , емкостным сопротивлением приэлектродных слоев и активным сопротивлением

плазмы [10]. Подчеркнем, что эквивалентное сопротивление плазмы и активное сопротивление плазмы определяются одними и теми же значениями концентрации и частоты столкновений электронов.

Рассмотрим малые значения вложенной в плазму мощности, $P_{pl} < 25$ Вт. Здесь наблюдается быстрый рост V , V_{dis} , I_i и I_c с увеличением P_{pl} . По мере роста P_{pl} возрастает роль индуктивного канала, растет плотность плазмы. Очевидно, что рост плотности плазмы приводит к увеличению проводимости плазмы, росту тока, текущего через емкостной канал (см. рис. 2), увеличению падения напряжения на разделительном конденсаторе, играющем роль балластного сопротивления, и насыщению зависимости $V_{dis}(P_{pl})$. Значения напряжения, приложенного к обкладкам конденсатора, тем меньше, чем меньше величина разделительной емкости C . При малых значениях C можно говорить о запирающей емкости канала. Здесь уместно отметить, что аналогичный эффект должен наблюдаться при переходе индуктивного ВЧ-разряда в H -моду.

Известно [11, 12], что в приэлектродных слоях пространственного заряда происходит генерация высших гармоник тока, текущего через емкостной канал. Естественно, что падение напряжения на разделительной емкости приводит к появлению высших гармоник в ВЧ-напряжении, подводимом к электродам емкостного канала разряда. Чем меньше разделительная емкость, тем сильнее выражен указанный эффект. В свою очередь наличие высших гармоник ВЧ-напряжения сопровождается усилением ангармонизма тока, текущего через емкостной канал.

Заключение

В настоящей работе показано, что при малых значениях мощности ВЧ-мощность поступает в разряд главным образом через емкостной канал. Рост вложенной в плазму мощности приводит к увеличению напряжения горения разряда и росту тока, текущего через антенну, увеличению доли мощности, поступающей в разряд через индуктивный канал. Рост энерговклада через индуктивный канал приводит к увеличе-

нию тока, текущего через емкостной канал, при этом повышается падение напряжения на разделительной емкости, включенной в емкостной канал разряда, что приводит к частичному запирающему емкостного канала. При малых значениях разделительной емкости при условии преобладающего вложения ВЧ-мощности через индуктивный канал самосмещение активного электрода становится положительным.

Вклад индуктивного канала тем больше, чем меньше величина разделительной емкости. При давлениях аргона менее 10 мторр и более 30 мторр роль индуктивного канала падает. Изменение величины разделительной емкости позволяет управлять величиной приэлектродных скачков потенциала, а следовательно, и энергий быстрой группы электронов.

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

Список литературы

1. Thomson J.J. // Philos. Mag. 1891. **32**. P. 321.
2. Townsend J.S., Donaldson R.H. // Philos. Mag. 1928. **5**. P. 178; 1929. **7**. P. 600.
3. Mak-Kinton K.A. // Philos. Mag. 1929. **8**. P. 605.
4. Баббам Г.И. // Вестн. электропромышленности. 1942. № 2; 3.
5. Godyak V.A., Piejak R.B., Alexandrovich B.M. // J. Appl. Phys. 1999. **85**, N 2. P. 703.
6. Попов О.А. Индукционные источники света: Учеб. пособие. М., 2010.
7. Кралькина Е.А. // Успехи физ. наук. 2008. **178**, № 5. С. 519.
8. Александров А.Ф., Вавилин К.В., Кралькина Е.А. и др. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2010. № 4. С. 71.
9. Александров А.Ф., Вавилин К.В., Кралькина Е.А. и др. // Физика плазмы. 2007. **33**, № 9. С. 802.
10. Александров А.Ф., Вавилин К.В., Кралькина Е.А. и др. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2010. № 1. С. 43.
11. Савинов В.П. Граничные эффекты емкостного высокочастотного разряда: Автореф. дисс. ... докт. физ.-мат. наук. М., 2002.
12. Райзер Ю.П., Шнейдер М.Н., Яценко Н.А. Емкостной высокочастотный разряд. М., 1995.

Influence of the external parameters on the peculiarities of a hybrid low-pressure radio-frequency discharge

K. V. Vavilin, M. A. Gomorev, E. A. Kralkina^a, P. A. Neklyudova, 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 present paper deals with the experimental study of the RF power input mechanism to the plasma of RF hybrid discharge that is sustained by the RF power unit representing spiral antenna connected in parallel with the capacitor electrodes. At low values of RF generator power the RF power is shown to be coupled through capacitive channel of the discharge, later at higher values of RF generator power the role of inductive channel becomes more significant. The lower is the value of the disjunctive capacitor included to the capacitive channel the higher is the contribution of the inductive channel.

Keywords: RF discharge, hybrid RF discharge, inductive and capacitive channels, near electrode RF sheaths of spatial charge, equivalent resistance, impedance.

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: queen_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: vincenzhao@mail.ru.