

РАДИОФИЗИКА, ЭЛЕКТРОНИКА, АКУСТИКА

Влияние индуктивного канала на параметры приэлектродных слоев пространственного заряда в гибридном ВЧ разряде

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

*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 17.09.2009, подписана в печать 18.10.2009

Экспериментально изучаются физические свойства новой модификации ВЧ разряда — гибридного ВЧ разряда (ГВЧР), поддерживаемого как вихревыми, так и потенциальными ВЧ электрическими полями, создаваемыми индуктивным и емкостным каналами разряда. Исследовано влияние индуктивного канала на параметры приэлектродных слоев пространственного заряда, определяющих емкостную составляющую физического механизма ГВЧР.

Ключевые слова: ВЧ разряд, гибридный ВЧ разряд, индуктивный и емкостный каналы разряда, приэлектродные слои пространственного заряда.

УДК: 537.721. PACS: 52.50.-b, 52.80.Ri, 52.80.-s.

Введение

Гибридный ВЧ разряд представляет собой новую модификацию ВЧ разряда, поддерживаемого как вихревыми, так и потенциальными ВЧ электрическими полями. Изучение физических свойств ГВЧР требует детального исследования взаимного влияния физических процессов, происходящих под действием электрических полей, поддерживаемых индуктивным и емкостным каналами разряда.

Основными индикаторами влияния емкостной составляющей на механизм поддержания ГВЧР являются параметры приэлектродных слоев пространственного заряда (ПСПЗ), а именно приэлектродный квазистационарный скачок потенциала U_s и толщина приэлектродного слоя d_s . Как известно [1], величина U_s определяет параметры приэлектродных электронных пучков, формирующих электронный энергетический спектр плазмы, обогащенный частицами высоких энергий. Наличие быстрых электронов в разряде приводит к увеличению характерных частот столкновений, а следовательно, к изменению закономерностей проникновения вихревых полей в плазму [2]. Известно [2], что для плазмы, поддерживаемой вихревыми ВЧ полями, характерны более высокие значения плотности, чем в случае чисто емкостного возбуждения разряда (ЕВЧР). Это в свою очередь приводит к изменению параметров (ПСПЗ).

Цель настоящей работы состоит в экспериментальном исследовании влияния индуктивного канала ГВЧР на толщину ПСПЗ и квазистационарный скачок потенциала в нем. В процессе экспериментов при одинаковых и тех же условиях определялись и сравнивались между собой величины U_s и d_s в ЕВЧР и ГВЧР. Предполагалось, что различие параметров ПСПЗ в этих разрядах обусловлено влиянием индуктивного канала.

1. Схема эксперимента и методика измерений

Источник плазмы представлял собой стеклянный цилиндр диаметром и длиной 15 см, расположенный между двумя диэлектрическими фланцами. Для возбуждения и поддержания разряда в источниках плазмы использовались спиральные антенны, закрепленные на боковой поверхности источников плазмы. Дополнительно к спирали на внутренней стороне нижнего и верхнего фланцев размещались обкладки конденсатора площадью S . Обкладка конденсатора, расположенная на нижнем электроде, была заземлена. Антenna и обкладки конденсатора подключались параллельно к одному ВЧ генератору, работающему на частоте $\omega = 13.56$ МГц. Мощность ВЧ генератора могла изменяться в диапазоне 0–300 Вт.

Для измерения параметров ПСПЗ (U_s , d_s) использовался оригинальный бесконтактный метод, описанный в работе [3]. Для реализации метода в цепь емкостного канала последовательно с электродами включались разделительные конденсаторы. Токи, текущие через антенну и конденсатор, измерялись с помощью пояса Роговского.

Измерения проводились в разряде в аргоне, диапазон давлений 10–200 м Торр.

2. Результаты измерений и их обсуждение

Результаты измерений скачка потенциала U_s и толщины слоя d_s около активного электрода в ЕВЧР и гибридном разряде в зависимости от ВЧ напряжения V_\sim , приложенного к антенне и конденсатору, представлены на рис. 1, 2.

Рассмотрим вначале поведение ключевого параметра — величины U_s . Как видно, в ЕВЧР при увеличении ВЧ напряжения V_\sim значения U_s сначала растут, достигают максимума и наконец уменьшаются. Рост

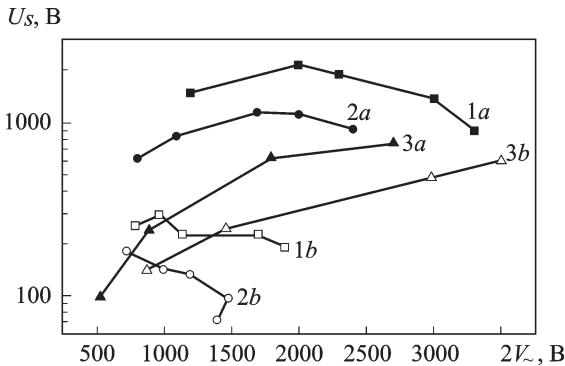


Рис. 1. Зависимость квазистационарного скачка потенциала в слое пространственного заряда у активного электрода от амплитуды ВЧ напряжения V_{\sim} : 1 — давление 0.01 Торр, 2 — 0.03 Торр, 3 — 0.2 Торр. Индекс «*a*» относится к емкостному разряду, «*b*» — к гибридному

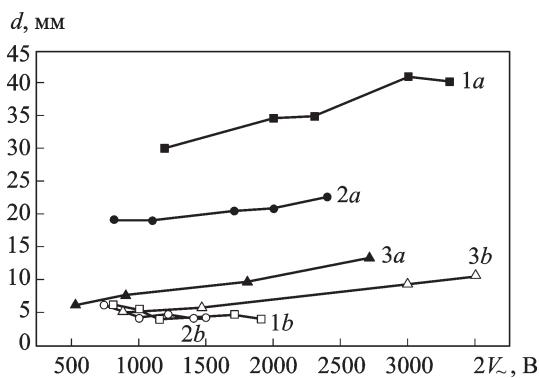


Рис. 2. Зависимость толщины слоя пространственного заряда у активного электрода от амплитуды ВЧ напряжения V_{\sim} : 1 — давление 0.01 Торр, 2 — 0.03 Торр, 3 — 0.2 Торр. Индекс «*a*» относится к емкостному разряду, «*b*» — к гибридному

давления аргона p приводит к уменьшению абсолютных значений U_s . Отметим, что аналогичные зависимости были получены ранее в работе [4]. Физически зависимость $U_s(V_{\sim})$ обусловлена характером поведения толщины слоя $d_s(V_{\sim})$, определяющим его импеданс $Z_s = \frac{4\pi d_s}{\omega S}$ и соответственно величины падения ВЧ напряжения на нем и его выпрямленного на нелинейной проводимости слоя квазистационарного напряжения U_s .

В ГВЧР зависимость U_s от V_{\sim} , p видоизменяется. При низких давлениях (0.01–0.03 Торр) U_s уменьшается с ростом V_{\sim} , а при большем давлении ($p = 0.2$ Торр) монотонно возрастает с увеличением V_{\sim} . Абсолютные значения приэлектродного скачка потенциала при давлениях 0.01–0.03 Торр существенно ниже, чем в ЕВЧР, причем наибольшая разница в значениях наблюдается при давлении 0.03 Торр. При давлении 0.2 Торр абсолютные значения U_s близки к полученным в ЕВЧР.

Относительно малые значения U_s , наблюдавшиеся в гибридном ВЧ разряде при низких давлениях ($p < 0.03$ Торр), говорят о сильном влиянии индуктивного канала на параметры емкостного канала. Результаты, представленные на рис. 1, убедительно показывают, что, изменяя величину V_{\sim} , можно существенно изменять величину U_s , а следовательно, и энергию электронных пучков, формируемых в слоях. Так, при давле-

нии 0.03 Торр удается получить величины U_s порядка 100 В, что обеспечивает формирование электронных пучков с энергиями $E \sim 100$ эВ, обогащающих плазму электронами с энергией, оптимальной для ионизации атомов электронным ударом [5].

Поведение толщины приэлектродного слоя d_s в зависимости от амплитуды приложенного ВЧ напряжения V_{\sim} и давления газа p в ЕВЧР и ГВЧР заметно отличается (рис. 2). В ЕВЧР толщина приэлектродного слоя увеличивается с ростом приложенного напряжения и уменьшением давления аргона. Толщина слоя в гибридном ВЧ разряде при давлении 0.2 Торр близка к величине, характерной для ЕВЧР. Напротив, при низких давлениях ($p \leq 0.03$ Торр) толщина слоя d_s в гибридном разряде существенно ниже, причем значения d_s уменьшаются при увеличении V_{\sim} .

Проанализируем роль индуктивного канала разряда при различных давлениях аргона. При изменении давления газа происходит изменение глубины скин-слоя, определяющего проникновение вихревых полей в плазму, а также величины длины свободного пробега электронов. При низких давлениях длина свободного пробега электронов превышает глубину скин-слоя и сравнима с геометрическими размерами источника плазмы. В связи с этим электроны, нагретые в скин-слое, ионизуют газ практически во всем объеме источника плазмы. В этом случае роль индуктивного канала гибридного ВЧ разряда велика. При давлении 0.2 Торр длина свободного пробега электронов сравнима с глубиной скин-слоя, которая составляет величину порядка 0.6 см. В связи с этим нагрев электронов осуществляется только в пристеночной области источника плазмы, где электроны и теряют приобретенную энергию. В этом случае свойства плазмы в основном объеме разряда определяются емкостным каналом разряда.

В заключение на основании измеренных величин U_s , d_s рассчитаем плотности ионного тока на электрод j_i , используя хорошо известный закон Чайлд–Ленгмюра [5]:

$$j_i = \frac{1}{9\pi} \left(\frac{2e}{M_i} \right)^{1/2} \frac{U_s^{3/2}}{d_s^2}.$$

Полученные результаты для давлений 0.01 и 0.03 Торр приведены на рис. 3. Для давления $p > 0.1$ Торр

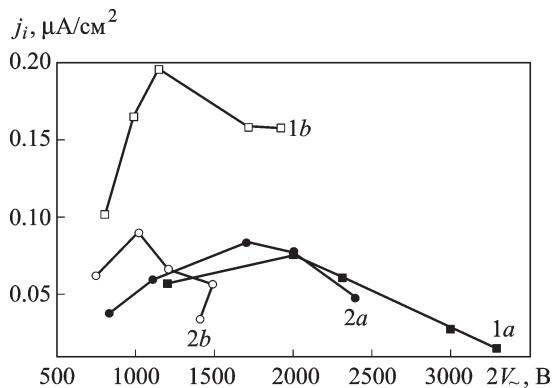


Рис. 3. Зависимость ионного тока текущего на активный электрод от амплитуды ВЧ напряжения V_{\sim} : 1 — давление 0.01 Торр, 2 — 0.03 Торр. Индекс «*a*» относится к емкостному разряду, «*b*» — к гибридному

вычисления плотности ионного тока j_i не проводились вследствие нарушения предположения о бесстолкновительном характере приэлектродного слоя.

Рисунок 3 демонстрирует, что при давлении 0.01 Торр плотность ионного тока в гибридном разряде существенно выше, чем в емкостном, однако величины j_i падают в области больших V_\sim . При давлении 0.03 Торр плотность ионного тока в гибридном разряде существенно понижается. Это связано с уменьшением скачка потенциала U_s (рис. 1).

Заключение

В работе рассмотрены закономерности изменения параметров приэлектродного слоя пространственного заряда вблизи электродов при изменении приложенного ВЧ напряжения в гибридном ВЧ разряде. Показано, что при давлениях менее 0.1 Торр наличие индуктивного канала гибридного ВЧ разряда приводит к существен-

ному уменьшению приэлектродного скачка потенциала и толщины слоя пространственного заряда. Увеличение давления аргона до $p \geq 0.2$ Торр сопровождается сближением свойств ГВЧР и ЕВЧР вследствие сильного скинирования вихревых ВЧ полей.

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

Список литературы

1. Ковалевский В.Л., Савинов В.П. // Физика плазмы. 1994. **20**, № 3. С. 322.
2. Кралькина Е.А. // УФН. 2008. **178**, № 5. С. 519.
3. Александров А.Ф., Рябый В.А., Савинов В.П., Якунин В.Г. // Физика плазмы. 2009. **28**, № 12. С. 1082.
4. Кузовников А.А., Ковалевский В.Л., Савинов В.П. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1983. № 4. С. 28.
5. Райзера Ю.П. Физика газового разряда. М., 1992.

Influence of the inductive channel on the parameters of the nearelectrode sheaths of spatial charge in the hybrid RF discharge

A. F. Alexandrov, K. V. Vavilin, E. A. Kralkina^a, V. B. Pavlov, V. P. Savinov^b, 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 results of the experimental study of the physical properties of the new modification of RF discharges, i.e., hybrid discharge, are presented. Hybrid RD discharge is maintained both by vortical and potential electric fields generated by inductive and capacitive channels of the discharge. The influence of the inductive channel on the parameters of the nearelectrode sheaths of spatial charge that indicates the properties of the capacitive component of the hybrid discharge is studied.

Keywords: RF discharge, hybrid RF discharge, inductive and capacitive channels, nearelectrode sheaths of spatial charge.

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

Received 17 September 2009.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 1(2010).

Сведения об авторах

1. Александров Андрей Федорович — докт. физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой; e-mail: alex@ph-elec.phys.msu.su.
2. Вавилин Константин Викторович — канд. физ.-мат. наук, науч. сотр.; e-mail: viline@inbox.ru.
3. Кралькина Елена Александровна — докт. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр.; e-mail: ekralkina@mail.ru.
4. Павлов Владимир Борисович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.; e-mail: vb_pavlov@mail.ru.
5. Савинов Владимир Павлович — докт. физ.-мат. наук, доцент; e-mail: savinov1983@yahoo.com.
6. Якунин Владимир Георгиевич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.; e-mail: yvgs1@bk.ru.