

УДК 533.9.004.14

## ИМПЕДАНС АСИММЕТРИЧНОГО КОНДЕНСАТОРА, ЗАПОЛНЕННОГО ПЛАЗМОЙ ВЧ ИНДУКЦИОННОГО РАЗРЯДА

**Д.В. Рафальський, С.В. Дудин**

*Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна  
61077, пл. Свободи 4, г. Харків, Україна  
e-mail: [dmytro\\_rafalskyi@mail.ru](mailto:dmytro_rafalskyi@mail.ru)*

Поступила в редакцію 14 мая 2010 г.

В данной работе построена простая аналитическая модель ВЧ импеданса асимметричного плазменного конденсатора, образованного двумя электродами разной площади и заполненного плазмой ВЧ индукционного разряда низкого давления. Также представлены результаты экспериментальных измерений импеданса асимметричного плазменного конденсатора в системе с диаметром газоразрядной камеры 250 мм. Сравнение экспериментальных данных с результатами моделирования подтверждает применимость модели не только для оценок, но и для практически точного расчета ВЧ импеданса асимметричного плазменного конденсатора, заполненного плазмой ВЧ индукционного разряда. Предложенная модель может быть использована для расчета ВЧ цепей при конструировании плазменных технологических устройств с комбинированным ВЧ индукционно-емкостным разрядом.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** ВЧ индукционный разряд, ВЧ импеданс плазмы, плазменный конденсатор.

## ІМПЕДАНС АСИМЕТРИЧНОГО КОНДЕНСАТОРА, ЩО ЗАПОВНЕНИЙ ПЛАЗМОЮ ВЧ ІНДУКЦІЙНОГО РОЗРЯДУ

**Д.В. Рафальський, С.В. Дудін**

*Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна  
61077, пл. Свободи 4, м. Харків, Україна*

У даній роботі побудована проста аналітична модель ВЧ імпедансу асиметричного плазмового конденсатора, утвореного двома електродами різної площі і заповненого плазмою ВЧ індукційного розряду низького тиску. Також представлені результати експериментальних вимірювань імпедансу асиметричного плазмового конденсатора в системі з діаметром газорозрядної камери 250 мм. Порівняння експериментальних даних з результатами моделювання підтверджує можливість застосування моделі не тільки для оцінок, але і для практично точного розрахунку ВЧ імпедансу асиметричного плазмового конденсатора, заповненого плазмою ВЧ індукційного розряду. Запропонована модель може бути використана для розрахунку ВЧ ланцюгів при конструюванні плазмових технологічних пристроїв з комбінованим ВЧ індукційно-емнісним розрядом.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** ВЧ індукційний розряд, ВЧ імпеданс плазми, плазмовий конденсатор.

## IMPEDANCE OF ASYMMETRIC CAPACITOR FILLED BY RF INDUCTIVELY COUPLED PLASMA

**D.V. Rafalskyi, S.V. Dudin**

*V.N. Karazin Kharkiv National University  
61077, Svobody sq. 4, Kharkiv, Ukraine*

In this paper simple analytic model of RF impedance of asymmetric capacitor filled by low-pressure RF inductively coupled plasma is developed. Results of experimental measurements of the asymmetric capacitor impedance in the system with 250 mm diameter gas-discharge chamber are present. Comparison of the experimental data with the results of theoretical modeling shows possibility of not only estimations but for exact prediction of the plasma capacitor impedance using the developed model. The proposed model of the plasma capacitor impedance may be useful for RF circuit's design of plasma technological systems with combined RF inductive-capacitive discharge.

**KEYWORDS:** RF ICP, RF plasma impedance, plasma capacitor.

Системы с комбинированным ВЧ индукционно-емкостным разрядом получили широкое распространение в различных современных технологиях, в частности, в технологиях микро- и нанoeлектроники [1,2]. К таким системам относятся устройства для реактивного ионно-плазменного травления [2], а также односеточные источники ионов (ИИ) низкой энергии, позволяющие генерировать совмещенный поток ионов и электронов [3]. Благодаря использованию ВЧ индукционного разряда для ионизации рабочего газа в системах с комбинированным разрядом достигается высокая плотность тока ионов пучка (до 10 мА/см<sup>2</sup>), а использование ВЧ напряжения для ускорения ионов в приэлектродном слое пространственного заряда позволяет управлять энергией ионов независимо от плотности тока.

В рассматриваемых системах в плотную плазму ВЧ индукционного разряда вводятся электроды разной площади, к которым приложено ВЧ напряжение. При этом специфика систем, используемых в микроэлектронике, состоит в том, что диаметр электродов, как правило, превышает расстояние между ними. В результате ВЧ-диодного эффекта [2,4] в приэлектродных слоях пространственного заряда формируются постоянные падения напряжения, которые ускоряют ионы, попадающие из плазмы на электроды. Приложенное между электродами ВЧ напряжение распределяется между приэлектродными слоями, причем в

случае низкого давления, который будет рассмотрен в настоящей работе, отношение падений ВЧ напряжения на слоях равно четвертой степени отношения площадей электродов [2]. Тогда, при выполнении условия  $(S_2)^4 \gg (S_1)^4$  ( $S_2$  и  $S_1$  – площадь большего и меньшего электродов, соответственно), практически все ВЧ напряжение сосредоточено в слое возле электрода меньшей площади, в результате чего между электродами появляется постоянное напряжение автосмещения, значение которого близко к амплитуде приложенного ВЧ напряжения [2]. Необходимо отметить, что приложенное к электродам ВЧ напряжение влияет не только на ускорение ионов в приэлектродных слоях, но и на плазму в целом. Фактически, в этом случае реализуется комбинированный индукционно-емкостной разряд, изученный в работах [4,5]. В частности, в работе [4] было показано, что в комбинированном индукционно-емкостном разряде энергетическая цена иона может зависеть от амплитуды приложенного ВЧ напряжения.

Одна из проблем, возникающих при использовании систем с комбинированным разрядом заключается в том, что плазма является элементом питающей ВЧ цепи, причем параметры плазмы определяют ее импеданс, влияющий через трансформаторную связь на импеданс индуктора и через емкостную – на импеданс введенных в плазму электродов. Такая связь может приводить как к затруднению согласования плазменной нагрузки с ВЧ генератором, так и к возникновению различных неустойчивостей (срыв разряда, осцилляции, Е-Н переход).

Импеданс индуктора, связанного с плазмой был подробно изучен в работах [2,6-8]. Результаты этих работ могут быть применены и к комбинированному разряду, поскольку вклад емкостной составляющей в ионизацию рабочего газа гораздо меньше вклада индукционной компоненты. В то же время, ВЧ импеданс электродов в таких системах не может быть корректно описан известными закономерностями для ВЧ емкостного разряда [2], поскольку в этом случае импеданс определяется как параметрами плотной плазмы индукционного разряда, так и размерами приэлектродных слоев пространственного заряда.

Целью данной работы является экспериментальное и теоретическое изучение ВЧ импеданса асимметричного плазменного конденсатора (АПК), образованного двумя электродами разной площади и заполненного плазмой ВЧ индукционного разряда низкого давления.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО

Для экспериментального измерения ВЧ импеданса АПК, образованного двумя электродами разной площади и заполненного плазмой ВЧ индукционного разряда низкого давления, в настоящей работе использовался односеточный источник ионов с ВЧ питанием ионно-оптической системы [9], схематически показанный на рис. 1. В цилиндрической металлической газоразрядной камере источника с внутренним диаметром 250 мм и длиной  $L = 80$  мм, расположен 2-х витковый экранированный индуктор, обеспечивающий генерацию плазмы. К камере источника присоединен изолированный от неё заземленный фланец, к которому крепится извлекающая сетка. Для измерения плотности тока ионов из плазмы в центре сетки был установлен плоский зонд, на который подавалось смещение  $-25$  В. ВЧ мощность в диапазоне 50-2000 Вт была подведена к источнику от ВЧ генератора через двухканальное согласующее устройство. ВЧ смещение прикладывалось между заземленной сеткой и электродом, которым являлась камера источника, причем площадь поверхности камеры примерно в 3 раза превышала площадь сетки. Для достижения высокой однородности извлекаемого пучка ионов, в камеру источника был введен дополнительный электрод, электрически соединенный с камерой источника (см. рис. 1). Площадь и положение электрода были определены с помощью двумерного численного моделирования плазмы индукционного разряда [10]. Полностью металлическая конструкция с использованием водяного охлаждения всех элементов источника позволяли обеспечить возможность работы при пробных экспериментах с подводимой ВЧ мощностью вплоть до 2 кВт.

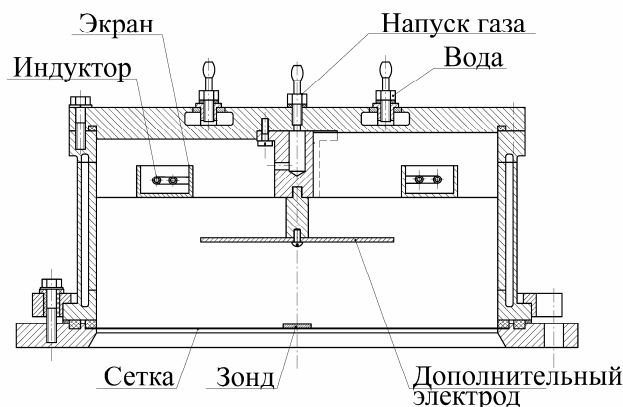


Рис. 1. Конструкция источника ионов

Откачка камеры источника производилась через извлекающую сетку источника турбомолекулярным насосом со скоростью откачки по воздуху 700 л/с. Остаточное давление в камере источника не превышало  $5 \cdot 10^{-6}$  Торр. Во всех экспериментах в качестве рабочего газа использовался аргон.

Ниже перечислены основные параметры источника ионов (рабочий газ - аргон) [9]:

- поглощаемая ВЧ мощность 50-2000 Вт;
- плотность тока ионов на входе ионно-оптической системы 0,5-10 мА/см<sup>2</sup>;
- интегральный ток пучка 0,1-2 А;
- неоднородность пучка на диаметре 250 мм <10%;
- энергия ионов 10-300 эВ;
- рабочее давление  $2 \cdot 10^{-4}$  -  $5 \cdot 10^{-3}$  Торр.

### МОДЕЛЬ ИМПЕДАНСА АПК

В настоящей работе рассматривается случай большой асимметрии электродов, введенных в плазму индукционного разряда ( $S_2^4 \gg S_1^4$ ). В этом случае основное падение ВЧ напряжения приходится на приэлектродный слой вблизи электрода с меньшей площадью, причем вследствие ВЧ диодного эффекта этот электрод заряжается отрицательно. ВЧ ток, текущий в цепи электрода, для упрощения расчета далее будет считаться синусоидальным.

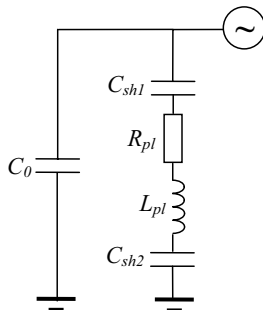


Рис.2. Эквивалентная схема АПК.

Эквивалентная схема асимметричного конденсатора, заполненного плазмой ВЧ индукционного разряда приведена на рис. 2. Импеданс АПК определяется собственной межэлектродной емкостью  $C_0$ , емкостью пристеночных слоев пространственного заряда  $C_{sh1}$  и  $C_{sh2}$ , а также комплексной проводимостью плазменного столба (соответствующий ей импеданс  $R_{pl} + i\omega L_{pl}$  на схеме). Собственная электрическая емкость  $C_0$  зависит от особенностей конструкции, и для использованного в настоящей работе источника ионов составила 300 пФ.

Как упоминалось выше, в случае большой асимметрии электродов, основное падение напряжения приходится на слой с электродом меньшей площади. Емкость этого слоя с учетом осцилляции электронов может быть определена из полученного в работе [2] выражения для результирующей емкости двух слоев в симметричном плазменном конденсаторе. Тогда емкость одного ВЧ слоя будет в два раза выше полученной в работе [2]

емкости двух последовательно включенных ВЧ слоев:

$$C_{shRF} = 2 \frac{0.613 \varepsilon_0 S_1}{d_{shRF}}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость вакуума,  $S_1$  – площадь меньшего электрода,  $d_{shRF}$  – толщина слоя пространственного заряда, определяемая в соответствии с законом Чайльда-Ленгмюра для ВЧ слоя [2]:

$$d_{shRF} = \sqrt{0.82 \varepsilon_0 \sqrt{\frac{2e_0}{m_i} \frac{U_E^{3/2}}{j_i}}}, \quad (2)$$

здесь  $e_0$  – заряд электрона,  $m_i$  – масса иона,  $U_E$  – амплитуда приложенного ВЧ напряжения,  $j_i$  – плотность тока ионов на стенку газоразрядной камеры.

Будем считать, что падение ВЧ напряжения на слое пространственного заряда вблизи электрода с большей площадью в АПК пренебрежимо мало по сравнению с собственным потенциалом плазмы индукционного разряда  $\varphi_{pl}$  (при соотношении площадей электродов 1:3 и ВЧ напряжении 200 В падение ВЧ напряжения на слое  $\sim 2,5$  В). Тогда для определения толщины этого слоя целесообразно использовать закон Чайльда-Ленгмюра для постоянного тока:

$$d_{shDC} = \sqrt{\frac{4}{9} \varepsilon_0 \cdot \sqrt{\frac{2e_0}{m_i} \frac{\varphi_{pl}^{3/2}}{j_i}}}. \quad (3)$$

Емкость слоя пространственного заряда вблизи электрода с большей площадью  $C_{shDC}$  может быть определена как емкость плоского конденсатора, образованного слоем пространственного заряда:

$$C_{shDC} = \frac{\varepsilon_0 S_2}{d_{shDC}}. \quad (4)$$

Результирующая емкость двух слоев пространственного заряда  $C_{sh}$  может быть записана как емкость последовательно соединенных конденсаторов:

$$C_{sh} = \frac{C_{shRF} C_{shDC}}{C_{shRF} + C_{shDC}}. \quad (5)$$

Для определения активной и реактивной составляющих импеданса плазменного столба,  $R_{pl}$  и  $\omega L_{pl}$  соответственно, можно использовать классическое выражение для проводимости плазмы  $\sigma_{plE}$  [2]:

$$\sigma_{plE} = \frac{e_0^2 n_e}{m_e (v_{ea} + i \cdot \omega)}, \quad (6)$$

где  $n_e$  – плотность плазмы,  $m_e$  – масса электрона,  $v_{ea}$  – частота электрон-атомных столкновений,  $\omega = 2\pi f$ , где  $f$  – частота ВЧ генератора.

Тогда, считая, что ВЧ ток течет в плазменном цилиндре с площадью поперечного сечения  $S_l$  длиной  $L$ , получим:

$$R_{pl} = \frac{L}{S_l} \operatorname{Re} \left[ \frac{1}{\sigma_{plE}} \right], \quad L_{pl} = \frac{L}{\omega S_l} \operatorname{Im} \left[ \frac{1}{\sigma_{plE}} \right]. \quad (7)$$

Согласно приведенной на рис. 2 схеме, полный импеданс АПК  $Z_E$  может быть записан в следующем виде:

$$Z_E = \frac{(-i/\omega C_0) \cdot Z_{plE}}{-i/\omega C_0 + Z_{plE}}, \quad Z_{plE} = -\frac{i}{\omega C_{sh}} + R_{pl} + i\omega L_{pl}. \quad (8)$$

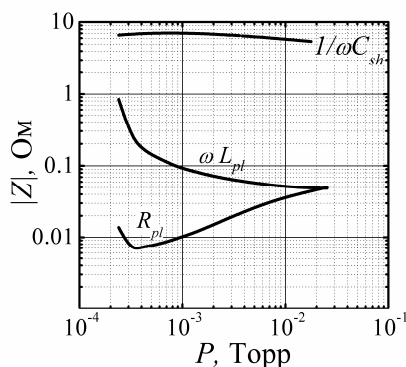


Рис.3. Активная и реактивная составляющие импеданса плазменного столба, и абсолютное значение результирующего импеданса пристеночных слоев пространственного заряда в зависимости от давления рабочего газа.

Получено для источника ионов с диаметром камеры 250 мм при поглощаемой мощности 500 Вт и ВЧ напряжении на электроде 100 В.

В полученные выражения входят такие величины, как плотность плазмы и частота электрон-атомных соударений. Для установления связи этих параметров с поглощаемой мощностью и давлением рабочего газа, можно воспользоваться известной пространственно-усредненной моделью ВЧ индукционного разряда [2]. На рис. 3 показаны рассчитанные таким образом зависимости абсолютных значений компонент импеданса АПК от давления рабочего газа (поглощаемая мощность 500 Вт, напряжение на электроде 100 В). Как видно, при рассматриваемых параметрах (геометрия камеры, интегральные параметры разряда) вкладом собственного импеданса плазменного столба в импеданс АПК можно пренебречь, – во всем диапазоне рассматриваемых параметров модуль собственного импеданса плазмы не превышает значения 1 Ом, что гораздо меньше импеданса пристеночных слоев пространственного заряда. Это связано с тем, что рассматривается система, в которой диаметр камеры значительно превышает ее длину, что и обуславливает очень высокую проводимость плазменного столба наряду с достаточно большой емкостью приэлектродных слоев.

Тогда, с учетом вышесказанного:

$$Z_E \approx -\frac{i}{\omega(C_0 + C_{sh})}. \quad (9)$$

ВЧ ток в цепи электрода, связанного с плазмой  $I_E$  можно определить из:

$$I_E = \frac{U_E}{|Z_E|}. \quad (10)$$

В полученные выражения для импеданса АПК входят такие величины, как амплитуда ВЧ напряжения на электродах  $U_E$  и плотность тока ионов в разряде  $j_i$  (за счет слагаемого  $C_{sh}$ ). Интегральный ток ионов на стенки камеры в индукционном разряде согласно пространственно-усредненной модели [2] пропорционален поглощаемой ВЧ мощности с коэффициентом  $\eta$ , который получил название «энергетическая цена иона» [4]. Энергетическая цена иона является функцией от температуры электронов и включает в себя как потери энергии в неупругих соударениях электронов, так и энергозатраты, связанные с выносом частиц на стенки разрядной камеры, и может быть рассчитана по известным выражениям [4].

В настоящей работе рассматривается случай, в котором для питания индуктора и электрода используется один источник ВЧ мощности. Такое подключение часто используется в системах с комбинированным разрядом, так как позволяет избежать целого ряда проблем, связанных с возникновением паразитных колебаний в ВЧ цепи. В системе с одним ВЧ генератором происходит распределение подводимой ВЧ мощности между «индукционной» и «емкостной» компонентами комбинированного разряда, и при фиксированной ВЧ мощности плотность тока ионов будет зависеть от величины приложенного ВЧ напряжения. Для определения этой взаимосвязи необходимо рассмотреть баланс мощности в комбинированном разряде.

Распределение мощности может быть определено следующим образом. Поглощаемая ВЧ мощность  $P_{abs}$  затрачивается на ионизацию рабочего газа (с учетом энергетической цены иона)  $P_{ion}$  и ускорение ионов  $P_{acc}$  в приэлектродном слое пространственного заряда:

$$P_{abs} = P_{ion} + P_{acc}. \quad (11)$$

Здесь мы будем считать, что мощность  $P_{ion}$  поглощается вследствие взаимодействия плазмы с вихревым полем индуктора, а мощность  $P_{acc}$  поглощается в приэлектродном слое.

Мощность  $P_{ion}$  определяется как:

$$P_{ion} = \eta j_i S_f, \quad (12)$$

где  $S_f = S_1 + S_2$  – площадь поверхности разрядной камеры. В случае существенной асимметрии электродов мощность  $P_{acc}$  может быть определена из:

$$P_{acc} = j_i S_1 U_{sb}. \quad (13)$$

Здесь  $U_{sb}$  – постоянное напряжение автосмещения на электроде. Как упоминалось выше, постоянное напряжение автосмещения  $U_{sb}$  в рассматриваемом случае низких давлений рабочего газа при выполнении условия  $(S_2)^4 \gg (S_1)^4$  практически совпадает с амплитудой приложенного ВЧ напряжения, т.е.  $U_{sb} \approx U_E$ .

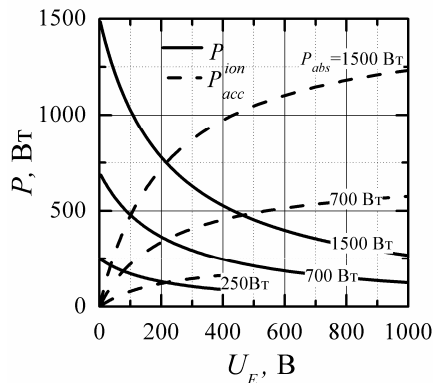
Тогда полная мощность, поглощаемая плазмой комбинированного индукционно-емкостного разряда:

$$P_{abs} = j_i (\eta S_f + U_{sb} S_1). \quad (14)$$

Выражение (14) устанавливает взаимосвязь между поглощаемой в разряде мощностью, плотностью тока ионов, ВЧ напряжением на электроде и геометрией разрядной камеры.

Количественное представление о распределении мощности в экспериментальной системе, используемой в настоящей работе, позволяет получить рис. 4, на котором приведены рассчитанные согласно (14) зависимости для  $P_{ion}$  и  $P_{acc}$  от напряжения на электроде  $U_{sb}$  для различных поглощаемых плазмой ВЧ мощностей  $P_{abs}$ . Зависимости были получены для источника ионов с диаметром камеры 250 мм и длиной 80 мм при давлении аргона в объеме источника 0,5 мТорр, что соответствует энергетической цене иона 85 эВ/ион. Из приведенных зависимостей видно, что в исследуемой системе при поглощаемой ВЧ мощности 700 Вт и более, может быть достигнуто ВЧ напряжение свыше 1000 В, соответствующее плотности тока ионов на стенку около 0,5 мА/см<sup>2</sup>.

Рис. 4. Зависимости мощности, затрачиваемой на ионизацию рабочего газа  $P_{ion}$  и ускорение ионов  $P_{acc}$  от ВЧ напряжения на электроде для разных ВЧ мощностей  $P_{abs}$ , поглощаемых плазмой.



Таким образом, выражение (9) с учетом распределения мощности в комбинированном разряде (14) позволяет рассчитать зависимость импеданса АПК от параметров системы. Результаты расчетов обсуждаются в следующем разделе в сравнении с экспериментальными данными.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Для экспериментальной проверки справедливости выражения (14) были измерены зависимости плотности тока ионов из плазмы от ВЧ напряжения на электроде. На рис. 5 приведена зависимость, полученная в соответствии с выражением (14), а так же результаты экспериментальных измерений.

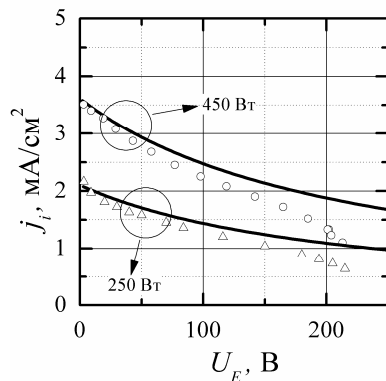


Рис.5. Зависимости плотности тока ионов из плазмы от ВЧ напряжения на электроде, рассчитанные в соответствии с выражением (14) (сплошные линии), и результаты экспериментальных измерений (символы). Кривые построены при давлении аргона в объеме источника 0,5 мТорр, что соответствует энергетической цене иона 85 эВ/ион.

Кривые получены для разных мощностей, поглощаемых плазмой – 250 Вт и 450 Вт. Можно отметить, что при напряжениях менее 150 В поведение теоретических зависимостей подтверждается экспериментальными измерениями. Вместе с тем, при увеличении напряжения на электроде до 200 В экспериментальные значения плотности тока показывают более быстрое падение, чем теоретически предсказываемое. По-видимому, это связано с ограниченной добротностью ВЧ контура электрода и наличием существенных потерь в нем, которые не учитывались в теоретической модели. В пользу данного утверждения свидетельствует сильный нагрев (более 100° С) подводящих элементов ВЧ цепи электрода при напряжениях на нем свыше 200 В, наблюдаемый экспериментально.

На рисунке 6а,б приведены теоретически рассчитанные зависимости абсолютного значения импеданса АПК  $|Z_E|$  от амплитуды ВЧ напряжения  $U_E$  в

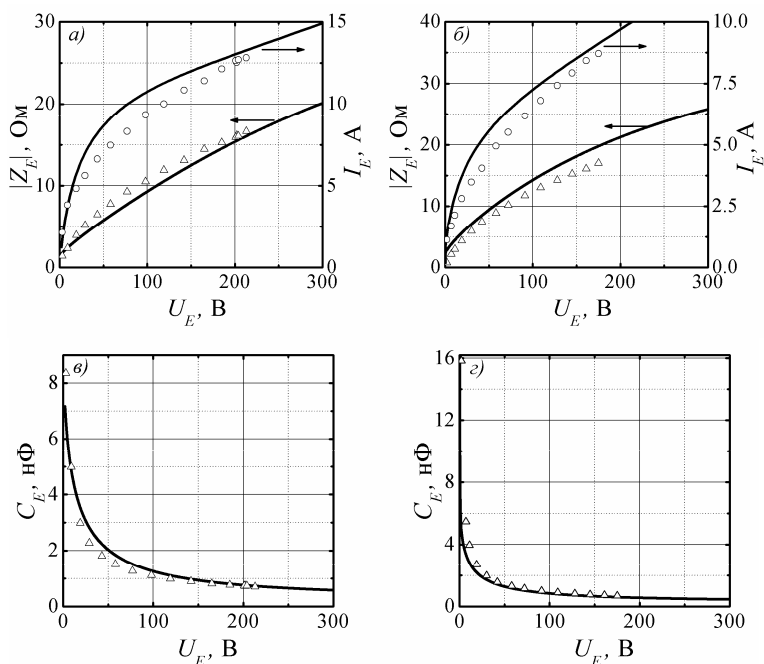


Рис. 6. Зависимости абсолютного значения импеданса АПК  $Z_E$  (а, б) и электрической емкости АПК (в, г), а также ВЧ тока в цепи электрода  $I_E$  (сплошные линии). Экспериментально измеренные значения этих величин показаны символами.

- а), в): мощность, поглощаемая плазмой 450 Вт, давление аргона 0,5 мТорр, что соответствует энергетической цене иона 85 эВ/ион;  
 б), г): мощность, поглощаемая плазмой 250 Вт, давление аргона 0,8 мТорр, что соответствует энергетической цене иона 95 эВ/ион.

могут приводить к существенным потерям в контуре, ограничивающим максимально достижимое ВЧ напряжение на электроде.

На рисунке 6в,г приведены теоретические и экспериментальные зависимости электрической емкости АПК от ВЧ напряжения на электроде. Экспериментальные зависимости были получены из измеренного ВЧ тока электрода в предположении исключительно емкостного импеданса АПК. Как видно, результаты теоретического моделирования хорошо согласуются с результатами экспериментальных измерений. Электрическая емкость АПК при небольших напряжениях достигает значения 16 нФ, что значительно превышает емкости всех элементов в цепи ВЧ питания электрода. По этой причине, учитывая используемую частоту ВЧ напряжения (13,56 МГц), значение резонансной индуктивности соленоида в питающем ВЧ контуре (<0,5 мкГн) может быть сопоставимо с паразитной индуктивностью ВЧ цепи, что необходимо учитывать при расчете согласующих устройств для таких систем.

Таким образом, в настоящей работе была построена простая аналитическая модель импеданса асимметричного плазменного конденсатора, образованного двумя электродами разной площади и заполненного плазмой ВЧ индукционного разряда низкого давления. Модель описывает АПК с геометрией, соответствующей реальным технологическим системам. Сравнение экспериментальных данных с результатами моделирования подтверждает применимость модели не только для оценок, но и практически точного расчета ВЧ импеданса асимметричного плазменного конденсатора, заполненного плазмой ВЧ индукционного разряда. Предложенная модель может быть использована для расчета ВЧ цепей при конструировании как односеточных источников ионов с ВЧ питанием ионно-оптической системы, так и плазменных реакторов с комбинированным ВЧ индукционно-емкостным разрядом низкого давления.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. G. Ian Brown The Physics and Technology of Ion Sources: Second, Revised and Extended Edition. - New York:Wiley. - 2004.
2. M.A. Lieberman and A.J. Lichtenberg Principles of Plasma Discharges and Materials Processing, 2nd edition. - New York: Wiley. - 2004.
3. S.V. Dudin, D.V. Rafalskyi On the simultaneous extraction of positive ions and electrons from single-grid ICP source // Europhysics Letters. – 2009. – Vol. 88, №5. - 55002.
4. С.В. Дудин, А.В. Зыков, К.И. Положий, В.И. Фареник Энергетическая цена иона в комбинированном индукционно-емкостном ВЧ разряде // Письма в ЖТФ. – 1998. – Т. 24, № 22. – С. 33-39.

предположении справедливости выражения (9), а также экспериментально измеренные значения этой величины. Экспериментально величина  $|Z_E|$  определялась как отношение амплитуды приложенного ВЧ напряжения к измеренной амплитуде ВЧ тока в цепи электрода. Представленные на рисунке 6 зависимости были получены для двух различных давлений рабочего газа в камере, и соответствуют различным значениям энергетической цены иона.

Кроме того, на рисунке показаны экспериментально измеренные и теоретически рассчитанные зависимости ВЧ тока в цепи электрода от напряжения на нем, полученные в соответствии с выражениями (9, 10).

Как видно из представленных графиков, результаты экспериментальных измерений ВЧ тока и модуля импеданса АПК находятся в хорошем соответствии с теоретическими зависимостями, полученными в предположении исключительно емкостного импеданса АПК (9), что подтверждает применимость данного подхода в исследуемом диапазоне параметров.

Отметим, что, как следует из рис. 6а,б ВЧ ток в цепи электрода достигает значения 15 А при ВЧ мощности 450 Вт. Учитывая скин-эффект, такие ВЧ токи

5. С.В. Дудин, А.В. Зыков, К.И. Положий Энергетическая оптимизация распылительных систем на базе ВЧ индукционно-емкостного разряда // Письма в ЖТФ. – 1996. – Т. 22, в.19. – С.54-59.
6. Д.В. Рафальский, К. И. Положий Влияние скин-эффекта на импеданс ВЧ индукционного разряда // «ВЕСТНИК Харьковского национального университета им. В.Н. Каразина», серия физическая «Ядра, частицы, поля». – 2007. - № 763, вып. 1(33). - С. 69-74.
7. Д.В. Рафальский, С.В. Дудин, К.И. Положий Возмущение импеданса ВЧ цепи индуктора плазмой низкой плотности // Физическая инженерия поверхности. – 2008. - Т.6, № 3-4.
8. К.І. Polozhiy, D.V. Rafalskyi An influence of the skin effect on plasma impedance in an inductively coupled RF discharge // Meeting of “Deutsche Physikalische Gesellschaft”. – 2008. – Darmstadt, Germany. - P.203.
9. С.В. Дудин, Д.В. Рафальский, А.В. Зыков Широкоапертурный высокочастотный источник ионов низкой энергии с электронной компенсацией // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2010, вып.2. С.52-55.
10. A.V. Gapon, A.N. Dahov, S.V. Dudin, A.V. Zykov, N.A. Azarenkov 2D fluid model for interactive development of icp technological tools // Problems of Atomic Science and Technology. – 2006. – №6. Series: Plasma Physics, Vol.12. – P.186.