

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ПЛАЗМЕННОГО КОНДЕНСАТОРА

МОРОЗОВ В. А., МИХЕЕВ Г. М.

Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения РАН, 426067, г. Ижевск, ул. Т. Барамзиной, 34

**АННОТАЦИЯ.** Разработана методика расчета электрической схемы замещения плазменного конденсатора для высокочастотных ионно-плазменных технологий. Приведен пример расчета конденсатора с электродами, состоящими из заземленного цилиндра и размещенных в нем двух электрически соединенных дисковых пластин. Проведенные расчеты были использованы при разработке плазмохимической установки, предназначенной для осаждения декоративных покрытий на основе кремния на изделия из стекла, фаянса и фарфора. Методика расчета может быть использована при проектировании высокочастотных плазменных реакторов, используемых для экспериментальных исследований физики газовых разрядов и в промышленности.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** высокая частота, плазменный конденсатор, ионно-плазменная технология, схема замещения, приэлектродный слой плазмы, методика расчета.

### ВВЕДЕНИЕ

С шестидесятых годов прошлого века высокочастотная (ВЧ) низкотемпературная плазма применяется для очистки поверхностей, плазмохимического осаждения и травления тонких слоев различных материалов при производстве полупроводников и интегральных микросхем [1, 2]. В настоящее время ВЧ плазма используется для модификации и полировки конструкционных материалов, очистки поверхности нанопорошков, модификации кожи, меха и ткани, предпосевной обработки семян растений и стерилизации медицинских материалов и инструмента [3 – 14].

Технологические процессы с применением ВЧ плазмы осуществляются на вакуумных установках, имеющих системы генерирования и оптимальной передачи энергии в нагрузку [15, 16]. Типичная ВЧ система состоит из генератора, линии передачи энергии, согласующего устройства и нагрузки (например, конденсатора с плазменным заполнением).

Разработка ВЧ системы всегда начинается с расчета нагрузки, при этом электрическая схема замещения нагрузки из емкости и сопротивления, которые включены параллельно, существенно упрощает электрический расчет устройства согласования [15 – 18]. Для плазменного конденсатора (ПК) с простой геометрией (например, конденсатора с параллельными, сферическими и коаксиальными электродами) схема замещения может быть определена по импедансу, который рассчитан в соответствии с [19, 20]. Однако для генерирования плазмы в вакуумных установках также используются ПК с электродами сложной геометрии. Существующие в настоящее время математические модели ВЧ емкостного разряда позволяют находить комплексную напряженность электрического поля  $\vec{E}_p$  и комплексную диэлектрическую проницаемость  $\epsilon_p$  плазмы в численном эксперименте [21]. Таким образом, вычислив

$$\dot{C} = \text{Re } \dot{C} + j \text{Im } \dot{C} = \frac{1}{U_{\text{hf}}^2} \int_V \epsilon_p \vec{E}_p \vec{E}_p^* dV, \quad (1)$$

можно найти импеданс ВЧ разряда

$$Z_p = \frac{1}{j \omega \dot{C}} = - \frac{\text{Im } \dot{C} + j \text{Re } \dot{C}}{\omega \left[ (\text{Re } \dot{C})^2 + (\text{Im } \dot{C})^2 \right]} \quad (2)$$

и его схему замещения. Выше  $U_{\text{hf}}$  – ВЧ напряжения на электродах конденсатора,  $V$  – объем плазмы и  $\omega$  – угловая частота колебаний электрического поля.

Необходимо отметить, что для практических расчетов целесообразно использовать простые способы определения схемы замещения ПК. Такой способ предложен нами в работах [15, 16], где было принято, что на ВЧ приэлектродные слои (ПС) плазмы, толщиной примерно равной электронному радиусу Дебая  $\lambda_{De}$ , имеют емкостной характер, а между слоями расположена плазма, имеющая активное сопротивление  $R_p$ . Исходя из этих допущений, было показано, что импеданс ВЧ разряда, заключенного между электродами конденсатора, определяется по выражению

$$Z_p = R_p - j \frac{1}{\omega C_{\pi}}, \quad (3)$$

где

$$R_p = \varepsilon \rho_p / C_{0p}, \quad (4)$$

$$C_{\pi} = C_{sl} S_{ra}, \quad (5)$$

$$C_{sl} = \varepsilon_0 / \lambda_{De} = \varepsilon_0 \omega_{pe} \sqrt{m_e / (kT_e)}, \quad (6)$$

$$S_{ra} = S_1 S_2 / (S_1 + S_2), \quad (7)$$

$\varepsilon_0$  – электрическая постоянная вакуума;  $k$  – постоянная Больцмана;  $m_e$  – масса электрона;  $\rho_p$  – удельное электрическое сопротивление плазмы;  $C_{0p}$  – емкость межэлектродного пространства, занятого плазмой при условии, что его диэлектрическая проницаемость равна  $\varepsilon$ ;  $C_{\pi}$  – приведенная емкость приэлектродных слоев плазмы;  $C_{sl}$  – удельная приэлектродная емкость плазмы;  $\omega_{pe}$  и  $T_e$  – плазменная частота и температура электронов;  $S_{ra}$  – приведенная площадь электродов;  $S_1$  и  $S_2$  – площади приэлектродных слоев плазмы.

Предложенная в [15, 16] модель имеет недостатки:

1. Она не является замкнутой, поскольку температура и плотность электронов плазмы должны задаваться на основе экспериментальных данных.
2. Она имеет низкую точность расчета на частотах существенно отличающихся от плазменной частоты электронов.
3. Её нельзя использовать для оценки степени воздействия на помещенные в плазму материалы.

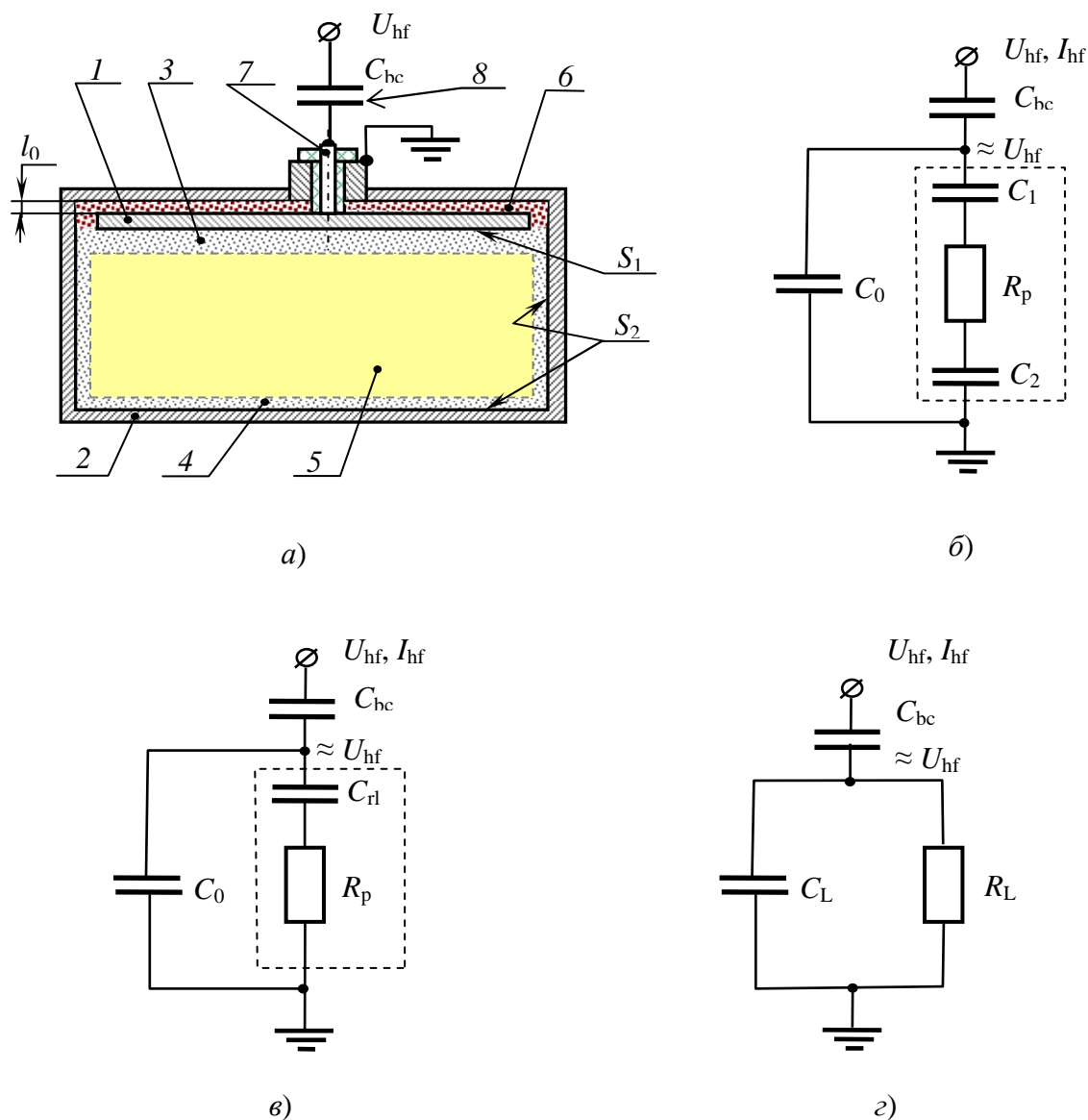
Несмотря на отмеченные недостатки, предложенная нами модель применялась для расчета схем замещения ПК, используемых для генерирования слаботочной неравновесной плазмы на частоте 13,56 МГц при давлении плазмообразующей среды от 1 до 67 кПа. Например, она использовалась при разработке ВЧ систем установок плазменного нанесения покрытий для малого предприятия «ФИЗИНТЕХ», (г. Санкт-Петербург, 1993 г.) и ЗАО «Ижевский завод мебельной фурнитуры» (г. Ижевск, 2000 г.) [16]. Экспериментальные данные, полученные при отладке опытных образцов этих установок, показали, что они хорошо согласуются с расчетами.

Цель настоящей работы – разработка методики расчета ПК без указанных выше недостатков и рассмотрение конкретного примера расчета схемы замещения.

## ПЛАЗМЕННЫЙ КОНДЕНСАТОР С ЭЛЕКТРОДАМИ СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРИИ. ПРИНЯТЫЕ ДОПУЩЕНИЯ

На рис. 1, а показан ПК с электродами сложной геометрии. К электроду конденсатора 1 приложено ВЧ напряжение  $U_{hf}$ . Между электродами 1 и 2 действует электрическое поле, раскачивающее электроны и ионы плазмы. Известно, что подвижность электронов много больше подвижности ионов, поэтому амплитуда колебаний электронов будет существенно больше амплитуды колебаний ионов. Следовательно, количество электронов, осевших на электроды, значительно превысит количество осевших ионов. В вакуумных установках один из электродов ПК заземляют. Заземленный электрод 2 не может иметь отрицательный потенциал – вместо него плазма 5 приобретает положительный потенциал, и его величина

определяется условием равенства электронного и ионного токов на границе между электродом 2 и ПС плазмы 4. Другой электрод (ВЧ), подключенный к источнику напряжения через разделительный конденсатор 8, взаимодействуя с плазмой, приобретает некоторый потенциал смещения, величина которого также определяется условием равенства электронного и ионного токов. Толщина ПС 3 и 4 определяется размером локализации электрического поля в слоях [19, 20]. На частотах близких к плазменной частоте электронов размер локализации примерно равен электронному радиусу Дебая. Непосредственно к электродам примыкает слой, входящий в ПС, толщина которого в среднем за период колебаний электрического поля равна амплитуде колебаний электронов [22 – 24]. Электрический потенциал в слоях изменяется от потенциала плазмы до потенциала электродов [1, 25, 26].



1 – ВЧ электрод, 2 – заземленный электрод (вакуумная камера), 3 и 4 – приэлектродные слои плазмы, 5 – положительно заряженный столб плазмы, 6 – межэлектродный промежуток без плазмы, 7 – ВЧ ввод, 8 – разделительный конденсатор,  $C_0$  – электрическая емкость ВЧ электрода и ввода с участками без плазмы относительно корпуса

**Рис. 1. ВЧ плазменный конденсатор:** а) – структура реактора для плазменных технологий; б) – схема замещения плазменного конденсатора на переменном токе; в) – параллельно-последовательная схема замещения; г) – параллельная схема замещения

Падения потенциалов в ПС указывают на то, что в них присутствуют электрические поля, создающие потоки положительных заряженных ионов в сторону электродов, при этом кинетическая энергия ионов и колеблющихся электронов может быть использована для различных технологических целей (очистка, распыление; управление структурой, смачиваемостью, плотностью, проводимостью и т.п. разных материалов).

Материалы, подвергаемые плазменной обработке, как правило, помещают на электроды, учитывая при этом, что энергии, рассеиваемые на материалах, определяются отношением площадей электродов, находящихся в контакте с плазмой [1, 27]. Материалы также размещают между электродами, т.к. в плазме ВЧ разряда любые материалы, независимо от их проводящих свойств, становятся электропроводными и, по сути, являются электродами [28, 29].

В настоящей работе принято следующее:

1. Возбуждение плазмы в вакуумной камере осуществляется с помощью квазистационарной электрической цепи, геометрия которой удовлетворяет условию [20, 30]  $l \ll c / \omega$ , где  $l$  – максимальный линейный размер цепи (включая размеры плазмы) и  $c$  – скорость света в вакууме.

2. Циклическая частота колебаний электромагнитного поля должна удовлетворять выражению  $\omega_{pi} < \omega < \omega_{pe}$ , а давление газа в вакуумной камере неравенству  $v_e \gg \omega_{pe}$  (здесь  $\omega_{pi}$  – ионная плазменная частота,  $v_e$  – частота столкновений электронов в плазме). Частота 13,56 МГц и давление в камере от 1 до 67 кПа удовлетворяют этим условиям; для них удельное сопротивление и относительная диэлектрическая проницаемость плазмы соответственно равны [19, 26]:

$$\rho_p = \frac{v_e}{\epsilon_0 \omega_{pe}^2} \left[ 1 + \left( \frac{\omega}{v_e} \right)^2 \right] \approx \frac{v_e}{\epsilon_0 \omega_{pe}^2} \quad (8)$$

и

$$\epsilon_r \approx 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2 + v_e^2} - \frac{\omega_{pi}^2}{\omega^2 + v_i^2} < 1, \quad (9)$$

где

$$\omega_{pe} = \sqrt{n_e e^2 / (\epsilon_0 m_e)}, \quad (10)$$

$$\omega_{pi} = \sqrt{n_i Z_i^2 e^2 / (\epsilon_0 m_i)}, \quad (11)$$

$m_i$ ,  $v_i$  и  $Z_i$  – масса, частота столкновений и кратность ионизации иона,  $e$  – заряд электрона.

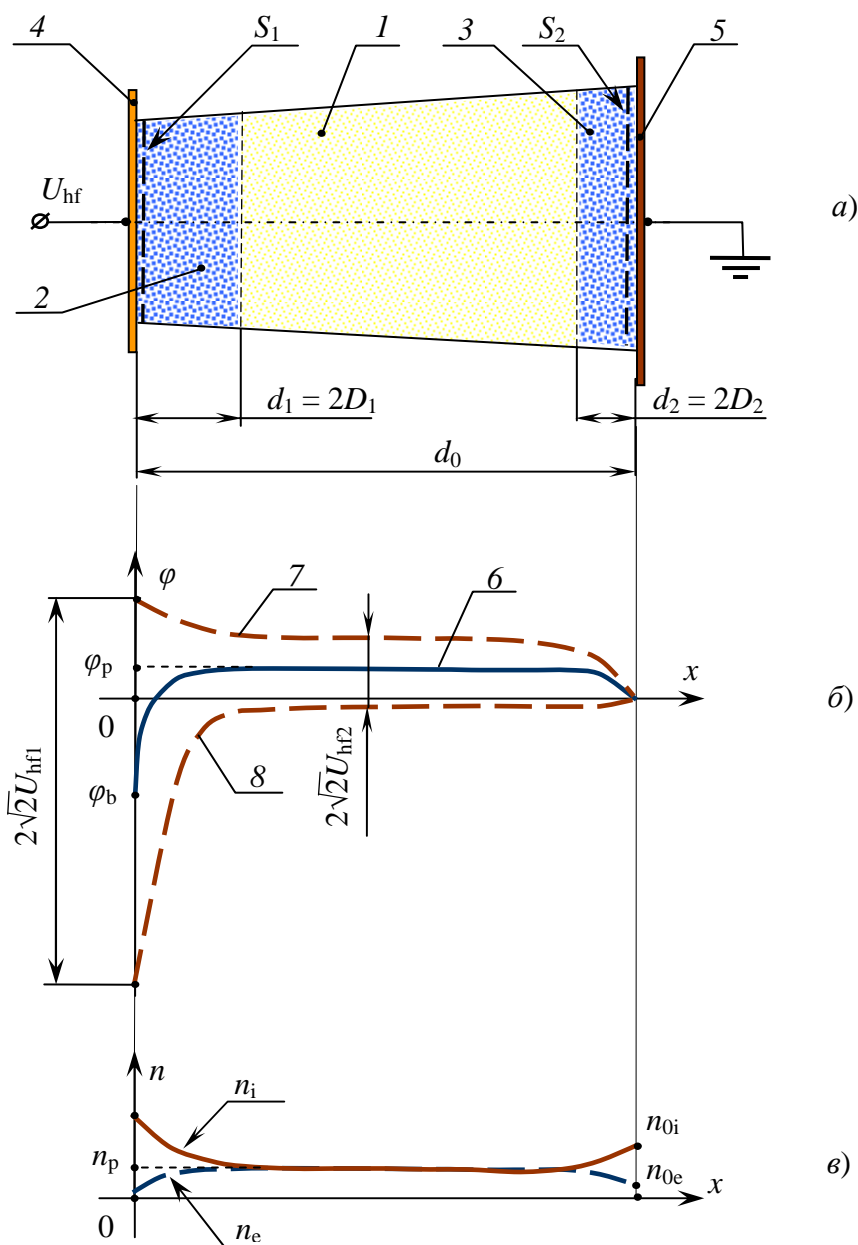
3. Считаем, что плазма в разрядном промежутке состоит из положительно заряженного столба с постоянным распределением электронов и ионов при их примерно равных концентрациях ( $n_e \approx n_i$ ), а также двух ПС толщиной  $d_1$  и  $d_2$  с переменными концентрациями электронов и ионов в слоях (рис. 2, а).

4. Полагаем, что плазма неравновесная ( $T_e \gg T_i$ ) и подчиняется статистике Больцмана, а концентрации электронов и ионов формулам:

$$n_e = n_{0e} \exp[e \varphi / (k T_e)], \quad (12)$$

$$n_i = n_{0i} \exp[-Z e \varphi / (k T_i)]. \quad (13)$$

Распределение электрического потенциала  $\varphi$  в разрядном промежутке на ВЧ показано на рис. 2, б [1]. Используя эту зависимость и формулы (12) и (13), можно спрогнозировать, как ведут в плазме концентрации электронов и ионов (рис. 2, в).



1 – положительно заряженный столб плазмы, 2 и 3 – приэлектродные слои плазмы, 4 и 5 – электроды, 6 – постоянная составляющая потенциала, 7 и 8 – предельные значения потенциала (с учетом суммирования ВЧ и постоянной составляющей потенциала),  $\varphi_p$  – потенциал положительно заряженного столба плазмы,  $\varphi_b$  – потенциал смещения ВЧ электрода относительно земли

**Рис. 2.** Структура и распределение электрического потенциала  $\varphi$ , концентрации электронов  $n_e$  и ионов  $n_i$  в разрядном промежутке: а) – структура разрядного промежутка; б) – распределение электрического потенциала в разрядном промежутке; в) – модельные профили концентрации электронов  $n_e$  и ионов  $n_i$  в разрядном промежутке в соответствии со статистикой Больцмана

5. Ввиду того, что концентрации электронов  $n_e$  и ионов  $n_i$  в ПС сильно изменяются, то также будет изменяться электронная  $\omega_{pe}$  и ионная  $\omega_{pi}$  плазменная частоты и, в соответствии с зависимостью (9), электрическая проницаемость  $\epsilon_r$ . Электронный радиус Дебая определяется выражением

$$\lambda_{De} = \frac{\sqrt{kT_e/m_e}}{\omega_{pe}} = \sqrt{\frac{\epsilon_0 kT_e}{n_e e^2}}. \quad (14)$$

Таким образом, этот параметр также не может быть постоянным, т.к. в разрядном промежутке сильные изменения испытывают  $n_e$  и температура электронов  $T_e$  [31].

Причина локализации (экранировки) электромагнитного поля в ПС связана с существенными изменениями электрической проницаемости в этих зонах. На ВЧ размер локализации определяется выражением [19, 25]

$$D = \lambda_{De} \frac{\omega_{pe}}{\omega} = \frac{\sqrt{kT_e/m_e}}{\omega}. \quad (15)$$

6. Принимаем, что постоянная составляющая потенциала плазмы в слоях приближенно описывается формулами (см. рис. 2, б):

$$\varphi_1 = \varphi_p + (\varphi_b - \varphi_p) \exp(-x/D_1) \quad (16)$$

и

$$\varphi_2 = \varphi_p \{1 - \exp[(x - d_0)/D_2]\}. \quad (17)$$

Затем, используя (16) и (17), находим напряженности электрического поля и электрическую энергию ПС. Приравнявая электрическую энергию энергии конденсатора, получаем формулу для расчета емкости слоев

$$C_j = \varepsilon_0 \varepsilon_{rj} S_j / d_j; \quad j = 1, 2, \quad (18)$$

где размеры  $d_j = 2 D_j$  выполняют функцию эффективной толщины ПС.

7. Плазменный конденсатор имеет сильную электрическую асимметрию, что связано с конструктивными особенностями ПК: во-первых, электрод 2 заземлен (рис. 1, а) и, во-вторых, площадь электрода 1 всегда меньше площади электрода 2. Отсюда следует, что толщина ПС у заземленного электрода будет много меньше, чем толщина слоя у ВЧ электрода (это экспериментальный факт [24]). Таким образом, реактивное сопротивление ПС у электрода с меньшей площадью значительно больше, чем у заземленного и, следовательно, практически вся электромагнитная энергия будет сосредоточена на ВЧ электроде.

8. Газовый разряд приводит к распылению электродов и, следовательно, влияет на чистоту проводимых в вакуумной камере процессов. Поэтому разряд на участках между электродами, которые не участвуют в технологическом процессе, гасят. Для этих участков размер  $l_0$  (рис. 1, а) должен быть меньше длины свободного пробега электронов в плазме (эффект обходного пути Гитторфа [32]).

9. Емкость конденсатора 8 (рис. 1, а) выбираем из условия  $C_{bc} \gg C_L$ . Например, на частоте 13,56 МГц  $C_{bc} \geq 3000$  пФ. В этом случае конденсатор не шунтирует нагрузку и, в дальнейших расчетах, его емкость можно не учитывать. Основное назначение блокирующего конденсатора: увеличение энергии ионов, взаимодействующих с ВЧ электродом, и защита электрических цепей ВЧ системы от отрицательного напряжения смещения.

На рис. 1, б приведена электрическая схема замещения ПК на переменном токе. В соответствии с рис. 1, б и в приведенная емкость ПС плазмы определяется так:

$$C_{п1} = C_1 C_2 / (C_1 + C_2). \quad (19)$$

Расчет параметров  $C_L$  и  $R_L$  параллельной схемы замещения (рис. 1, в) проводится по выражениям [15, 16]

$$C_L = C_0 + C_{п1} / (\omega Z C_{п1})^2, \quad (20)$$

$$R_L = Z^2 / R_p, \quad (21)$$

где

$$Z = \sqrt{1 + (\omega R_p C_{п1})^2} / (\omega C_{п1}), \quad (22)$$

а сопротивление плазмы рассчитывается по формуле (4).

## РАСЧЕТ ПРИВЕДЕННОЙ ЕМКОСТИ ПРИЭЛЕКТРОДНЫХ СЛОЕВ ПЛАЗМЫ

Приведенную емкость ПС плазмы  $C_{\text{pl}}$  определяем в соответствии с выражением (19). В связи с тем, что толщина слоя примерно постоянна по всей площади электродов (рис. 2), приэлектродная емкость каждого из электродов вычисляется по формуле конденсатора с параллельными обкладками (см. формулу (18)). Подставляем (18) в (19) и получаем

$$C_{\text{pl}} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{r1} S_1 S_2}{2D_1 \left[ (\varepsilon_{r1} d_2) / (\varepsilon_{r2} d_1) \right] S_1 + S_2}. \quad (23)$$

Соотношение (23) приводим к виду (4), т.е.

$$C_{\text{pl}} = C_{\text{sl}} S_{\text{ra}}, \quad (24)$$

где, с учетом (15), удельная приэлектродная емкость плазмы

$$C_{\text{sl}} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{r1} \omega}{2\sqrt{kT_{e1}/m_e}} \quad (25)$$

и приведенная площадь электродов ПК

$$S_{\text{ra}} = \frac{S_1 S_2}{\left[ (\varepsilon_{r1} \sqrt{T_{e2}}) / (\varepsilon_{r2} \sqrt{T_{e1}}) \right] S_1 + S_2} < S_1. \quad (26)$$

В дальнейшем принимаем  $\varepsilon_{r1} \approx 1$  и  $\varepsilon_{r1} / \varepsilon_{r2} \approx 1$  (см. формулу (9)). В статье [31] представлены результаты экспериментов по исследованию профилей электронной температуры емкостного ВЧ разряда на частоте 13,56 МГц при давлении аргона от 1,3 до 130 Па в диапазоне напряжений  $U_{\text{hf}} \leq 400$  В. Было установлено: температура в разрядном зазоре не постоянна. В положительном столбе плазмы температура медленно уменьшается к заземленному электроду, а в ПС – быстро падает к электродам, причем  $T_{e2} / T_{e1} \approx 0,72$ . Поэтому (26) перепишем так:

$$S_{\text{ra}} \approx \frac{S_1 S_2}{\sqrt{T_{e2}/T_{e1}} S_1 + S_2} \approx \frac{S_1 S_2}{0,85 S_1 + S_2} < S_1. \quad (27)$$

Погрешность расчета приведенной емкости ПС плазмы в соответствии с (24), (25) и (27) не более 50 %. Рассчитаем удельную приэлектродную емкость плазмы  $C_{\text{sl}}$  на частоте 13,56 МГц ( $\omega = 8,52 \cdot 10^7$  рад/с). Типичная температура электронов в плазмохимии  $T_{e1} \approx T_e = 0,6$  эВ  $\approx 7000$  К [1, 2]; далее  $\varepsilon_0 = 8,85$  пФ/м,  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К и  $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$  кг [33]. И в соответствии с (25), получаем  $C_{\text{sl}} = 1,16 \cdot 10^{-9}$  Ф/м<sup>2</sup> = 0,116 пФ/см<sup>2</sup>.

В научно-техническом отчете [34] приводится рис. 10.2, на котором представлена экспериментальная зависимость удельной емкости ВЧ разряда от давления газа в вакуумной камере для частот 2, 7,5 и 14 МГц. На частоте 14 МГц и давлении в камере 13 Па удельная емкость разряда (т.е. удельная приэлектродная емкость плазмы) примерно равна 0,11 пФ/см<sup>2</sup>, что хорошо согласуется с представленной выше численной оценкой.

## ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА АКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПЛАЗМЫ

С целью упрощения вычислений принимаем следующее:

1. ПС плазмы имеют нулевую толщину, т.е.  $d_j = 0$ .
2. Удельное сопротивление плазмы между электродами ПК  $\rho_p = \text{const}$  и рассчитывается по выражению (8).
3. Электрическая проницаемость пространства, занятого плазмой,  $\varepsilon = 1$ , а размерностью емкости  $C_{\text{op}}$  является длина.

Таким образом, активное сопротивление плазмы, как следует из (4), находим по соотношению

$$R_p \approx \rho_p / C_{\text{op}}. \quad (28)$$

Емкость  $C_{0p}$  определяется следующим образом. Пространство, занятое плазмой и ограниченное электродами, разбивается на элементы с емкостями  $C_{0pk}$ . Производится расчет емкостей (например, по формулам работы [35]); для параллельного включения

$$C_{0p} = \sum_k C_{0pk} \quad (29)$$

В плазмохимии широкое распространение получили конденсаторы с геометрией электродов, приведенных на рис. 3:

1. Конденсатор с параллельными электродами площадью  $A$ , расстояние между электродами  $\delta$  (рис. 3, а); емкость рассчитывается по выражению [33, с. 119]

$$C_{0p} = A/\delta \quad (30)$$

2. Конденсатор с цилиндрическими электродами диаметром  $b_2, b_1$  и длиной  $h$  (рис. 3, б); емкость определяется по формуле [33, с. 119]

$$C_{0p} = \frac{2\pi h}{\ln(b_2/b_1)} \quad (31)$$

3. Конденсатор с дисковым электродом диаметром  $b_1$ , который находится внутри цилиндрического длинного электрода диаметром  $b_2$  (рис. 3, в); емкость определяется так [35, с. 212]:

$$C_{0p} = 4b_1 f(b_1/b_2); \quad (32)$$

значения функции  $f(b_1/b_2)$  приведены на рис. 5-43 [35].

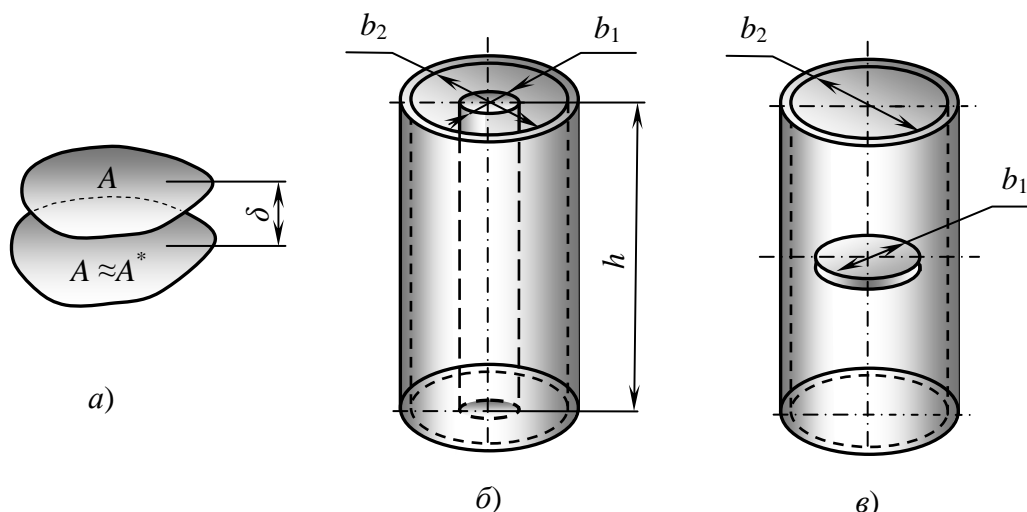


Рис. 3. Геометрия конденсаторов с различной формой электродов: а) – конденсатор с параллельными электродами; б) – конденсатор с цилиндрическими электродами (образуют коаксиальную систему); в) – конденсатор с электродами в форме диска, расположенного внутри прямого цилиндрического электрода

## МЕТОДИКА И ПРИМЕР РАСЧЕТА СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ВЧ ПЛАЗМЕННОГО КОНДЕНСАТОРА

Порядок определения схемы замещения ВЧ плазменного конденсатора приводится в таблице. В качестве примера рассмотрим расчет схемы замещения ПК вакуумной установки плазмохимического осаждения декоративных покрытий на основе кремния на изделия из диэлектрических материалов. Вакуумная установка проектировалась малым предприятием «ФИЗИНТЕХ» (г. Санкт-Петербург), а расчеты и опытно-конструкторские работы ВЧ системы этой установки выполнялись малым предприятием «Резонанс» (г. Ижевск).

Исходные данные для расчета ВЧ системы: мощность генератора 2 кВт, частота 13,56 МГц, рабочая среда в реакторе – одно из соединений кремния (в качестве модельных газов выбраны СО и СО<sub>2</sub>), давление газа в реакторе 0,1 мм рт. ст., компоновка электродов ПК показана на рис. 4.

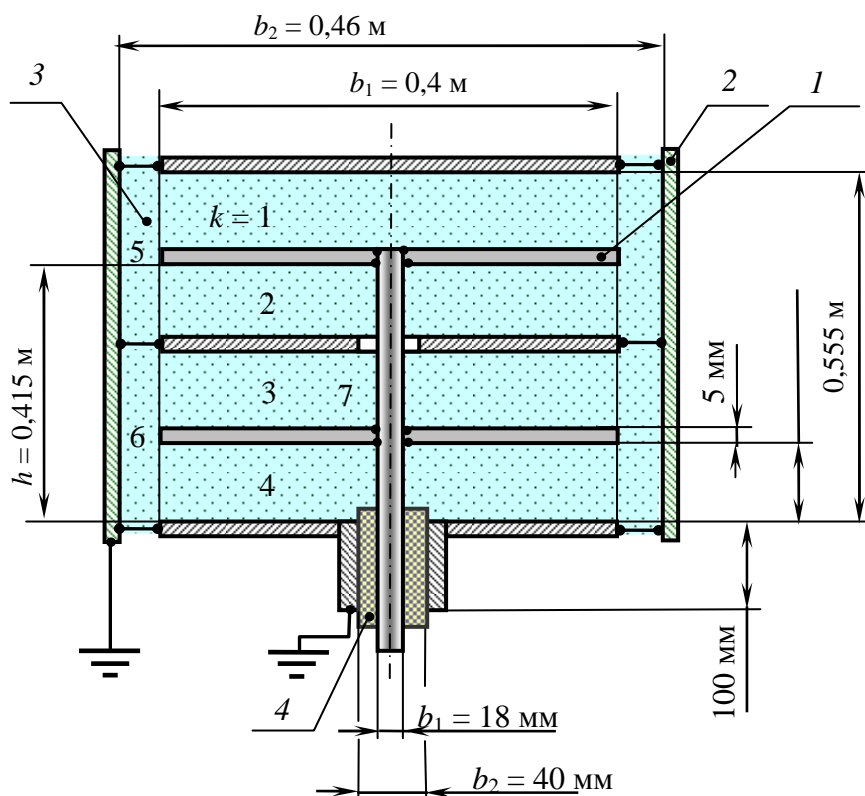


Определяем параметры параллельной схемы замещения плазменного конденсатора (таблица). В дальнейшем они используются при разработке нагрузочной системы (устройства согласования и ПК) [15 – 18, 37, 38]. Отладка и испытание опытного образца установки плазмохимического осаждения декоративных покрытий показали, что результаты расчетов, выполненные в соответствии с [15, 16], согласуются с результатами испытаний. Заметим, основным недостатком ПК (см. рис. 4) является несимметричный подвод электромагнитной энергии к ВЧ электроду, который приводит к неравномерному распределению энергии в плазме и, как следствие, неравномерной скорости осаждения покрытий на изделия (дефект устраняется изменением точки ввода энергии на ВЧ электрод).

Таблица

Алгоритм и пример расчета схемы замещения ВЧ плазменного конденсатора

Определяется или выбирается	Расчетная формула	Расчет для модельного газа		
		СО	СО <sub>2</sub>	Примечание
1. По результатам экспериментов находим отношение частоты столкновений электрона $v_e$ к давлению в вакуумной камере $p$	$(v_e / p)_{ex}$	$1,8 \cdot 10^9$ 1/(мм рт. ст.·с)	$5,7 \cdot 10^9$ 1/(мм рт. ст.·с)	[26, с. 79]
2. Частота столкновений электрона $v_e$ на давлении $p$	$(v_e / p)_{ex} \cdot p$	$1,8 \cdot 10^8$ 1/с	$5,7 \cdot 10^8$ 1/с	$p = 0,1$ мм рт. ст. $\approx$ $\approx 13,3$ Па
3. По результатам экспериментов находим концентрацию электронов $n_e$ в плазме		$3,52 \cdot 10^{14}$ 1/м <sup>3</sup>		$n_e$ определена на частоте 12 МГц и $p = 13,3$ Па [1, с. 22]
4. Электронная плазменная частота $\omega_{pe}$	(10)	$1,06 \cdot 10^9$ рад/с		Значения $\epsilon_0, k, m_e$ и $e$ взяты из [33]
5. Удельная приэлектродная емкость плазмы $C_{sl}$	(25)	$0,116$ пФ/см <sup>2</sup>		$T_e \approx 7000$ К [1, 2]
6. Площадь электрода $S_1$		$0,519$ м <sup>2</sup>		Рис. 4
7. Площадь электрода $S_2$		$1,306$ м <sup>2</sup>		
8. Приведенная площадь электродов $S_{ra}$	(27)	$0,388$ м <sup>2</sup>		
9. Приведенная емкость ПС плазмы $C_{rl}$	(24)	$450,1$ пФ		Рис. 1, в
10. Удельное электрическое сопротивление плазмы $\rho_p$	(8)	$22,16$ Ом·м	$58,60$ Ом·м	$\omega = 8,52 \cdot 10^7$ рад/с, рис. 1, в
11. Разбиваем пространство между электродами, занятое плазмой, на элементы с емкостями $C_{opk}$ ; емкости параллельно включенных элементов $\sum C_{opk}$	$k = 1 \dots 4$ ; (30)	$3,733$ м		Рис. 4; рис. 3, а
	$k = 5, 6$ ; (32)	$8$ м		Рис. 4; рис. 3, в
	$k = 7$ ; (31)	$0,805$ м		Рис. 4; рис. 3, б
12. Емкость $C_{op}$	(29)	$12,538$ м		
13. Активное сопротивление плазмы $R_p$	(28)	$1,77$ Ом	$4,67$ Ом	Рис. 1, в
14. Емкость $C_0$ , рис. 1	$\frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r h}{\ln(b_2/b_1)}$	$14,6$ пФ		Рис. 4, для фторопласта Ф-4 $\epsilon_r = 2,1$ [36]
15. Параметры $C_L$ и $R_L$ параллельной схемы замещения	$Z$ , (22)	$26,10$ Ом	$26,49$ Ом	Рис. 1, з
	$C_L$ , (20)	$463,9$ пФ	$450,8$ пФ	
	$R_L$ , (21)	$384,9$ Ом	$150,3$ Ом	
16. Значения напряжения $U_{hf}$ и тока $I_{hf}$ на ВЧ вводе при $P_L = 2$ кВт	[17, 18], см. примеч.	$877$ В	$548$ В	Рис. 1; $\sqrt{P_L R_L}$ ; $\sqrt{\frac{P_L [1 + (\omega R_L C_L)^2]}{R_L}}$
		$34,8$ А	$21,4$ А	



1 – ВЧ электрод, 2 – заземленный электрод,  
3 – плазма и 4 – ВЧ ввод в вакуумную камеру

Рис. 4. Компоновка электродов плазменного конденсатора

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, данная работа является продолжением исследования, изложенного в [15, 16]. В ней значительно повышена точность расчета емкости ПС плазмы на частоте существенно отличающейся от плазменной частоты электронов. Упрощена процедура определения активного сопротивления плазмы. Разработана методика расчета параллельной схемы замещения ПК и рассмотрен пример расчета, использованный при разработке нагрузочной системы установки плазмохимического осаждения покрытий из газовой фазы (установка использовалась в промышленности). Аналогичный расчет использовался при проектировании цепи подачи ВЧ напряжения смещения на электрод (держатель деталей) установки магнетронного напыления декоративных покрытий [16]. Заметим, что на качество разработки нагрузочной системы существенное влияние оказывает количество модельных газов (практика применения методики показала, что их должно быть не менее четырех).

Недостатком методики является то, что она, как и в [15, 16], не является замкнутой, т.к. температура, частота столкновений и концентрация электронов в плазме должны задаваться на основе экспериментальных данных.

Результаты данной работы можно использовать для оценки степени воздействия ВЧ плазмы на помещенные в ПК материалы. Для этого необходимо выполнить электрический расчет последовательной схемы замещения (см. рис. 1, б), затем определить падения высокочастотной и постоянной составляющей напряжения в ПС [1, 26], найти энергии ионов в слоях и сравнить их с порогом распыления материала деталей и электродов. Это тема отдельного исследования и в настоящей работе не рассматривается.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рябов Н. С., Кутюлин С. А., Бойкин Н. И. Физико-химические особенности процессов плазмохимического травления: Обзоры по электронной технике. Серия 7. Технология, организация производства и оборудование. М.: ЦНИИ "Электроника", 1981. Вып. 20 (844). 74 с.
2. Шепелев С. Н., Васильев В. Ю., Попов В. П. Плазмохимическое осаждение тонких слоев в реакторах пониженного давления. Часть 1. Оборудование для осаждения слоев: Обзоры по электронной технике. Серия 2. Полупроводниковые приборы. М.: ЦНИИ "Электроника", 1986. Вып. 7 (1242). 54 с.
3. Абдуллин И. Ш., Желтухин В. С. Применение ВЧ-плазмы пониженного давления в процессах полировки поверхности твердых тел // Вестник Казанского технологического университета. 2003. № 1. С. 136-143.
4. Абдуллин И. Ш., Желтухин В. С., Сагбиев И. Р., Шаехов М. Ф. Модификация нанослоев в высокочастотной плазме пониженного давления. Казань: Изд-во КГТУ, 2007. 354 с.
5. Райныш В. А., Шурупов А. В., Шурупов М. А. Пылевая плазма в решении проблем нанотехнологий порошковой металлургии // Нанотехника. 2012. № 1. С. 65-78.
6. Александров С. Е., Мишин М. В., Уваров А. А., Чиркова И. В. Разработка технологии получения нанодисперсных порошков в плазме высокочастотного емкостного разряда при атмосферном давлении // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского политехнического университета. 2008. № 2(54). С. 116-121.
7. Абдуллин И. Ш., Шарифуллин Ф. С. Высокочастотный разряд в процессах наноструктурной модификации материалов // Вестник Казанского технологического университета. 2012. Т. 15, № 13. С. 40-46.
8. Абдуллин И. Ш. Высокочастотные разряды пониженного давления в плазмохимических процессах // Вестник Казанского технологического университета. 2010. № 4. С. 172-186.
9. Абдуллин И. Ш., Абуталипова Л. Н., Желтухин В. С., Красина И. В. Высокочастотная плазменная обработка в динамическом вакууме капиллярно-пористых материалов. Теория и практика применения. Казань: Изд-во КГТУ, 2004. 427 с.
10. Филиппов А. К., Федоров М. А., Филиппов Д. А., Филиппов Р. А. Способ обработки семян растений и устройство для его осуществления // Патент РФ № 2317668, 2008.
11. Морозова Н. С., Никишаев В. И., Грицай И. М. Очистка, дезинфекция, стерилизация эндоскопов и инструментов к ним. Киев: ТОВ «Біі Граф», 2006. 72 с.
12. Кипчакбаев А. Д., Лавров Б. А., Слепченко А. С., Федоров А. О., Скороход Г. А. Способ стерилизации объектов медицинского назначения // Патент РФ № 2008923, 1994.
13. Стерилизатор плазменный универсальный // ООО «МедТеКо». URL: <http://www.medteco.ru/ru/> (дата обращения 29.11.2018).
14. Ажаронков В. В., Кратько Л. Е., Некрашевич Я. И., Филатова И. И., Мельникова Л. А., Дудчик Н. В., Янецкая С. А., Болога М. К. Исследование бактерицидного действия плазмы высокочастотного и барьерного разрядов на микроорганизмы // Инженерно-физический журнал. 2009. Т. 82, № 3. С. 425-432.
15. Морозов В. А., Михеев Г. М., Зонов Р. Г. Высокочастотные нагрузочные системы с емкостным возбуждением плазмы для пленочных технологий // Труды конференции «Нанотехнологии – производству - 2006». 29-30 ноября 2006 г., Фрязино 2006. М.: «Янус-К», 2006. С. 266-280.
16. Морозов В. А. Высокочастотные нагрузочные системы для емкостного возбуждения плазмы: Автореф. дис. канд. техн. наук. Ижевск, УдГУ, 2007. 27 с.
17. Морозов В. А. Особенности расчета контура третьего вида, используемого в нагрузочных системах высокочастотных технологических установок // Электротехника. 2005. № 2. С. 59-64.
18. Морозов В. А., Михеев Г. М. Особенности расчета высокочастотной нагрузочной системы с цепью согласования из параллельного колебательного контура с неполным включением // Электротехника. 2006. № 8. С. 53а-58.
19. Александров А. Ф., Кузелев М. В. Теория плазменного конденсатора с учетом пространственной дисперсии // Радиотехника и электроника. 2010. Т. 55, № 5. С. 589-600.
20. Александров А. Ф., Кузелев М. В., Рухадзе А. А. К теории электрических цепей с плазменными элементами // Радиотехника и электроника. 2010. Т. 55, № 7. С. 826-844.
21. Гончаров В. Д., Фискин Е. М. Математическая модель тлеющего высокочастотного разряда // Вакуумная техника и технология. 2008. Т. 18, № 3. С. 197-200.
22. Дулькин А. Е., Мошкалева С. А., Смирнов А. С., Фролов К. С. Исследование высокочастотного емкостного разряда низкого давления // Журнал технической физики. 1993. Т. 63, вып. 7. С. 64-73.
23. Смирнов А. С. Прикладная физика. Физика газового разряда: учебное пособие. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1997. 68 с.
24. Смирнов А. С., Орлов К. Е. Самосогласованная модель высокочастотного емкостного разряда низкого давления // Письма в Журнал технической физики. 1997. Т. 23, № 1. С. 39-45.
25. Райзер Ю. Р. Высокочастотный емкостной разряд и его приложения // Соросовский образовательный журнал. Физика. 1999. № 8. С. 90-96.
26. Райзер Ю. Р. Физика газового разряда. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1992. 536 с.

27. Дудин С. В., Зыков А. В., Положий К. И. Энергетическая оптимизация распылительных систем на базе комбинированного ВЧ индукционно-емкостного разряда // Письма в Журнал технической физики. 1996. Т. 22, вып. 19. С. 54-59.
28. Вознесенский Э. Ф., Дресвянников А. Ф., Красина И. В., Кулевцов Г. Н. Структурные изменения кожевенных материалов под воздействием высокочастотной плазмы пониженного давления // Вестник Казанского технологического университета. 2005. № 2. С. 265-268.
29. Абдуллин И. Ш., Желтухин В. С., Панкратова О. В., Сагбиев И. Р. Некоторые аспекты численного моделирования взаимодействия плазмы со сплошными и капиллярно-пористыми материалами // Ученые записки Казанского университета. Серия Физико-математические науки. 2007. Т. 149, № 4. С. 36-44.
30. Новый политехнический словарь / гл. ред. А.Ю. Ишлинский. М.: Большая Российская энциклопедия, 2000. 671 с.
31. Лисовский В. А. Особенности alpha-gamma перехода в ВЧ разряде низкого давления в аргоне // Журнал технической физики. 1998. Т. 68, № 5. С. 52-60.
32. Кноль М., Эйхмейр И. Техническая электроника. Том 1. Физические основы электроники. Вакуумная техника. М.: Энергия, 1971. 472 с.
33. Кошкин Н. И., Ширкевич М. Г. Справочник по элементарной физике. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1965. 248 с.
34. Оптимизация системы ВЧ магнетронного распыления и обработка режимов получения диэлектрических слоев сложного состава // Отчет о НИР, Московский институт радиоэлектроники, электроники и автоматики. М., 1986. С. 113.
35. Иоссель Ю. Я., Кочанов Э. С., Струнский М. Г. Расчет электрической емкости. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергоиздат, Ленинградское отделение, 1981. 288 с.
36. ГОСТ 10007-80. Фторопласт Ф-4. Технические условия. М., 2005. 15 с.
37. Морозов В. А., Михеев Г. М. Исследование электрического сопротивления покрытого проводника методом падающих и отраженных волн // Химическая физика и мезоскопия. 2012. Т. 14, № 1. С. 131-142.
38. Морозов В.А., Михеев Г.М. Простой расчет поперечного сечения электрического провода на низких и высоких частотах // Электротехника. 2005. № 4. С. 54-60.

---

## CONSTRUCTION OF AN EQUIVALENT ELECTRICAL CIRCUIT FOR A HIGH-FREQUENCY PLASMA CAPACITOR

Morozov V. A., Mikheev G. M.

Udmurt Federal Research Center, Ural Branch of the Russian Academy of Science, Izhevsk, Russia

**SUMMARY.** High-frequency (HF) low-temperature plasma is widely used for surface cleaning, plasma-chemical sedimentation, and etching of thin layers of various materials in semiconductor and integrated circuit production. In the present day HF plasma is also used for polishing and modification of construction materials, purification of nanopowder surfaces, modification of leather, fur and fabric, pre-sowing seed treatment, and sterilization of medical tools, equipment and materials. A commonly used in practical applications HF device consists of a generator, an energy transmission line, an impedance matching device, and a plasma capacitor as an electric load. In this article, a method of calculation of an equivalent electrical circuit for a plasma capacitor in HF ion-plasma technologies has been developed. An example calculation of a capacitor with electrodes, consisting of earthed cylinder and two electrically connected disk-shaped plates put into it, is demonstrated. The calculation was used for the development of a plasma-chemical installation, which is intended for deposition of silicon-based decorative coatings on glass, earthenware and porcelain products. The developed method of calculation can be employed for designing HF plasma reactors, which are used in industry and experimental research in gas discharge physics.

**KEYWORDS:** high frequency, plasma capacitor, ion-plasma technology, equivalent circuit, near-electrode plasma layer, calculation method.

## REFERENCES

1. Ryabov N. S., Kutolin S. A., Boykin N. I. *Fiziko-khimicheskie osobennosti protsessov plazmokhimicheskogo travleniya: Obzory po elektronnoy tekhnike. Seriya 7. Tekhnologiya, organizatsiya proizvodstva i oborudovanie* [Physicochemical features of plasma-chemical etching processes: Reviews on electronic engineering. Series 7. Technology, organization of production and equipment]. Moscow: Central Scientific Research Institute "Electronics" Publ., 1981. Iss. 20(844). 74 p.
2. Shepelev S. N., Vasil'ev V. Yu., Popov V. P. *Plazmokhimicheskoe osazhdenie tonkikh sloev v reaktorakh ponizhennogo davleniya. Chast' 1. Oborudovanie dlya osazhdeniya sloev: Obzory po elektronnoy tekhnike. Seriya 2. Poluprovodnikovye pribory* [Plasma chemical deposition of thin layers in reduced pressure reactors. Part 1. Equipment

- for the deposition of layers: Reviews on electronic equipment. Series 2. Semiconductor devices]. Moscow: Central Scientific Research Institute "Electronics" Publ., 1986. Iss. 7(1242). 54 p.
3. Abdullin I. Sh., Zheltukhin V. S. Primenenie VCh-plazmy ponizhennogo davleniya v protsessakh polirovki poverkhnosti tverdykh tel [Application of HF-plasma of reduced pressure in the process of polishing solid surfaces]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of Kazan Technological University], 2003, no. 1, pp. 136-143.
  4. Abdullin I. Sh., Zheltukhin V. S., Sagbiev I. R., Shaekhov M. F. *Modifikatsiya nanosloev v vysokochastotnoy plazme ponizhennogo davleniya* [Modification of nanolayers in high-frequency low-pressure plasma]. Kazan: KGTU Publ., 2007. 354 p.
  5. Raynysh V. A., Shurupov A. V., Shurupov M. A. Pylevaya plazma v reshenii problem nanotekhnologii poroshkovoy metallurgii [Dust plasma in solving problems of powder metallurgy nanotechnologies]. *Nanotekhnika* [Nanotechnology], 2012, no. 1, pp. 65-78.
  6. Aleksandrov S. E., Mishin M. V., Uvarov A. A., Chirkova I. V. Razrabotka tekhnologii polucheniya nanodispersnykh poroshkov v plazme vysokochastotnogo emkostnogo razryada pri atmosfernom davlenii [Development of technology for producing nano-dispersed powders in plasma of a high-frequency capacitive discharge at atmospheric pressure]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo politekhnicheskogo universiteta* [St. Petersburg Polytechnic University Journal of Engineering Science and Technology], 2008, no. 2(54), pp. 116-121.
  7. Abdullin I. Sh., Sharifullin F. S. Vysokochastotnyy razryad v protsessakh nanostrukturnoy modifikatsii materialov [High-frequency discharge in the processes of nanostructural modification of materials]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of Kazan Technological University], 2012, vol. 15, no. 13, pp. 40-46.
  8. Abdullin I. Sh. Vysokochastotnye razryady ponizhennogo davleniya v plazmokhimicheskikh protsessakh [High-frequency discharges of reduced pressure in plasma-chemical processes]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of Kazan Technological University], 2010, no. 4, pp. 172-186.
  9. Abdullin I. Sh., Abutalipova L. N., Zheltukhin V. S., Krasina I. V. *Vysokochastotnaya plazmennaya obrabotka v dinamicheskom vakuume kapillyarno-poristykh materialov. Teoriya i praktika primeneniya* [High-frequency plasma treatment in dynamic vacuum of capillary-porous materials. Theory and practice of application]. Kazan: KGTU Publ., 2004. 427 p.
  10. Filippov A. K., Fedorov M. A., Filippov D. A., Filippov R. A. Sposob obrabotki semyan rasteniy i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya [Method of treating plant seeds and device for its implementation]. *Patent RU 2317668*, 2008.
  11. Morozova N. S., Nikishaev V. I., Gritsay I. M. *Ochistka, dezinfektsiya, sterilizatsiya endoskopov i instrumentov k nim* [Cleaning, disinfection, sterilization of endoscopes and tools for them]. Kiev: TOV «Bii Graf» Publ., 2006. 72 p.
  12. Kipchakbaev A. D., Lavrov B. A., Slepchenko A. S., Fedorov A. O., Skorokhod G. A. Sposob sterilizatsii ob'ektov meditsinskogo naznacheniya [Method for sterilization of medical facilities]. *Patent RU 2008923*, 1994.
  13. *Sterilizator plazmennyy universal'ny* [Sterilizer plasma universal]. OOO «MedTeKo». URL: <http://www.medteco.ru/ru/> (accessed November 29, 2018).
  14. Azharonok V. V., Krat'ko L. E., Nekrashevich Y. I., Filatova I. I., Mel'nikova L. A., Dudchik N. V., Yanetskaya S. A., Bologa M. K. Bactericidal action of the plasma of high-frequency capacitive and barrier discharges on microorganisms. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2009, vol. 82, no. 3, pp. 419-426.
  15. Morozov V. A., Mikheev G. M., Zonov R. G. Vysokochastotnye nagruzochnye sistemy s emkostnym vzbuzhdeniem plazmy dlya plenochnykh tekhnologiy [High-frequency load systems with capacitive plasma excitation for film technologies]. *Trudy konferentsii Nanotekhnologii – proizvodstvu – 2006* [Proceedings of the Conference Nanotechnologies - production - 2006]. 29-30 noyabrya 2006 g., Fryazino 2006. Moscow: Janus-K Publ., 2006, pp. 266-280.
  16. Morozov V. A. *Vysokochastotnye nagruzochnye sistemy dlya emkostnogo vzbuzhdeniya plazmy* [High-frequency load systems for capacitive excitation of plasma]. Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk. Izhevsk, UdGU, 2007. 27 p.
  17. Morozov V. A. Osobennosti rascheta kontura tret'ego vida, ispol'zuemogo v nagruzochnykh sistemakh vysokochastotnykh tekhnologicheskikh ustanovok [Features of the calculation a contour of the third kind used in loading systems of high-frequency technological installations]. *Elektrotehnika* [Russian Electrical Engineering], 2005, no. 2, pp. 59-64.
  18. Morozov V. A., Mikheev G. M. High-frequency loading system with a parallel matching circuit. *Russian Electrical Engineering*, 2006, vol. 77, no. 8, pp. 44-48.
  19. Aleksandrov A. F., Kuzelev M. V. Teoriya plazmennogo kondensatora s uchetom prostranstvennoy dispersii [Theory of a plasma capacitor with regard to spatial dispersion]. *Radiotekhnika i elektronika* [Journal of Communications Technology and Electronics], 2010, vol. 55, no. 5, pp. 589-600.
  20. Aleksandrov A. F., Kuzelev M. V., Rukhadze A. A. On the theory of electric circuits with plasma elements. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2010, vol. 55, no. 7, pp. 773-790.
  21. Goncharov V. D., Fiskin E. M. Matematicheskaya model' tleyushchego vysokochastotnogo razryada [Mathematical model of high-frequency glow discharge]. *Vakuumnaya tekhnika i tekhnologiya* [Vacuum technique and technology], 2008, vol. 18, no. 3, pp. 197-200.

22. Dul'kin A. E., Moshkalev S. A., Smirnov A. S., Frolov K. S. Issledovanie vysokochastotnogo emkostnogo razryada nizkogo davleniya [Investigation of high-frequency capacitive discharge of low pressure]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Journal of Technical Physics], 1993, vol. 63, iss. 7, pp. 64-73. <http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/15680>
23. Smirnov A. S. *Prikladnaya fizika. Fizika gazovogo razryada: uchebnoe posobie* [Applied Physics. Gas discharge physics: study guide]. St. Petersburg: SPbGTU Publ., 1997. 68 p.
24. Smirnov A. S., Orlov K. E. Self-consistent model of a low-pressure rf capacitive discharge. *Technical Physics Letters*, 1997, vol. 23, no. 1, pp. 26-28.
25. Rayzer Yu. R. Vysokochastotnyy emkostnoy razryad i ego prilozheniya [High-frequency capacitive discharge and its applications]. *Sorosovskiy obrazovatel'nyy zhurnal. Fizika* [Soros Educational Journal. Physics], 1999, no. 8, pp. 90-96.
26. Rayzer Yu. R. *Fizika gazovogo razryada* [Gas discharge physics]. 2-e izd., pererab. i dop. Moscow: Nauka Publ., 1992. 536 p.
27. Dudin S. V., Zykov A. V., Polozhiy K. I. Energeticheskaya optimizatsiya raspylitel'nykh sistem na baze kombinirovannogo VCh induktsionno-emkostnogo razryada [Energy optimization of spray systems based on a combined high-frequency inductive-capacitive discharge]. *Pis'ma v Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Technical Physics Letters], 1996, vol. 22, no. 19, pp. 54-59. <http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/20639>
28. Voznesenskiy E. F., Dresvyannikov A. F., Krasina I. V., Kulevtsov G. N. Strukturnye izmeneniya kozhevnykh materialov pod vozdeystviem vysokochastotnoy plazmy ponizhennogo davleniya [Structural changes of leather materials under the influence of high-frequency low-pressure plasma]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Vestnik Kazan Technological University], 2005, no. 2, pp. 265-268.
29. Abdullin I. Sh., Zheltukhin V. S., Pankratova O. V., Sagbiev I. R. Nekotorye aspekty chislennogo modelirovaniya vzaimodeystviya plazmy so sploshnymi i kapillyarno-poristymi materialami [Some aspects of numerical simulation of plasma interaction with solid and capillary-porous materials]. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki* [Scientific notes of the Kazan State University], 2007, vol. 149, no. 4, pp. 36-44.
30. *Novyy politekhnicheskii slovar'* [New Polytechnic Dictionary]. Gl. red. A.Yu. Ishlinskiy. Moscow: Bol'shaya Rossiyskaya entsiklopediya Publ., 2000. 671 p.
31. Lisovskii V. A. Features of the  $\alpha$ - $\gamma$  Transition in a low-pressure rf argon discharge. *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*, 1998, vol. 43, no. 5, pp. 526-534.
32. Knol' M., Eykhmeyr I. *Tekhnicheskaya elektronika. Tom 1. Fizicheskie osnovy elektroniki. Vakuumnaya tekhnika* [Technical electronics. Vol. 1. Physical fundamentals of electronics. Vacuum technology]. Moscow: Energiya Publ., 1971. 472 p.
33. Koshkin N. I., Shirkevich M. G. *Spravochnik po elementarnoy fizike* [Handbook of elementary physics]. 3-e izd., pererab. i dop. Moscow: Nauka Publ., 1965. 248 p.
34. *Optimizatsiya sistemy VCh magnetronnogo raspyleniya i otrabotka rezhimov polucheniya dielektricheskikh sloev slozhnogo sostava* [Optimization of the RF system of magnetron sputtering and development of modes for obtaining dielectric layers of complex composition]. Otchet o NIR, Moskovskiy institut radioelektroniki, elektroniki i avtomatiki [A report on research, Moscow Institute of Radio Electronics, Electronics and Automation. Moscow, 1986, p. 113.
35. Iossel' Yu. Ya., Kochanov E. S., Strunskiy M. G. *Raschet elektricheskoy emkosti* [Calculation of electrical capacitance]. 2-e izd., pererab. i dop. Leningrad: Energoizdat, Leningradskoe otdelenie Publ., 1981. 288 p.
36. *GOST 10007-80. Ftoroplast F-4. Tekhnicheskie usloviya* [GOST 10007-80. Fluoroplastic F-4. Technical conditions]. Moscow, 2005. 15 p.
37. Morozov V. A., Mikheev G. M. Issledovanie elektricheskogo soprotivleniya pokrytogo provodnika metodom padayushchikh i otrazhennykh voln [Determination of coated conductor's electric resistance by the method of incident and reflected waves]. *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya* [Chemical Physics and Mesoscopy], 2012, vol. 14, no. 1, pp. 131-142.
38. Morozov V. A., Mikheev G. M. Simple calculation of wire cross section at low and high frequencies. *Russian Electrical Engineering*, 2005, vol. 76, no. 4, pp. 67-75.

---

Морозов Виктор Александрович, кандидат технических наук, e-mail: [va.morozov@mail.ru](mailto:va.morozov@mail.ru)

Михеев Геннадий Михайлович, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории лазерных методов исследований, Институт механики УдмФИЦ УрО РАН, e-mail: [mikheev@udman.ru](mailto:mikheev@udman.ru)