

К. т. н. А. М. БУДЯНСКИЙ,  
к. ф.-м. н. В. И. ФАРЕНИК, А. П. ЯЦКОВ

Украина, г. Харьков, Национальный университет,  
Науч. физ.-технолог. центр  
E-mail: root@sptca.kharkov.ua

Дата поступления в редакцию  
30.01 2001 г.  
Оппоненты к. ф.-м. н. В. Г. КРЫЖАНОВСКИЙ,  
к. т. н. С. П. НОВОСЯДЛЫЙ

## ОСОБЕННОСТИ АВТОМАТИЗАЦИИ ДИОДНЫХ РЕАКТОРНЫХ СИСТЕМ МИКРОТРАВЛЕНИЯ

*Приведенные результаты можно использовать при разработке эффективного алгоритма настройки автоматического согласующего устройства промышленных установок.*

Технологические системы для нанесения и удаления тонких пленок на базе диодного (ВЧЕР) разряда получили широкое распространение в микроэлектронике. В ряде работ, например [1–3], проведено подробное исследование самостоятельного ВЧЕР, ВЧ диодного эффекта, возникающего в нем, образования ВЧ приэлектродных слоев, формирования потоков ускоренных ионов и  $\gamma$ -электронов, играющих существенную роль в механизме поддержания  $\alpha$ - и  $\gamma$ -режимов разряда [4–6].

Гораздо меньше литературных данных о требованиях к электрической цепи, служащей для эффективного возбуждения разряда, а также о поведении системы "ВЧ-генератор — разряд". Так, существующие аналитические и феноменологические модели [7–10] электрического импеданса ВЧЕР, определяющего поведение последнего в цепи ВЧ-генератора, не позволяют объяснить ряд экспериментально наблюдаемых явлений.

Например, при эксплуатации ВЧ газоразрядных систем, в особенности в промышленных установках, снабженных автоматически действующим согласующим устройством, обнаружилось, что при попытках оптимального согласования нагрузки с генератором могут наблюдаться скачкообразные изменения состояния разряда [11]. При этом автоматический режим настройки согласующего устройства становится невозможным из-за автоколебаний, возникающих в системе вследствие постоянной перенастройки контура.

Целью настоящей работы было экспериментальное исследование электрического импеданса ВЧЕР в области давлений  $P=10^{-2} - 10$  Тор, которая наиболее характерна для реальных технологических ВЧ-систем. Для объяснения наблюдаемых явлений ставилась задача изучить зависимость собственной емкости разряда от внешних условий и определить характер ее воздействия на резонансный контур согласующего устройства. Понимание особенностей этого воздействия позволило бы определить пути создания более совершенных алгоритмов настройки для автоматических согласующих устройств.

Для проведения необходимых измерений была создана установка, описанная ниже. Она состоит из разрядной камеры, системы ВЧ-возбуждения разряда и комплекса диагностических средств (рис. 1).

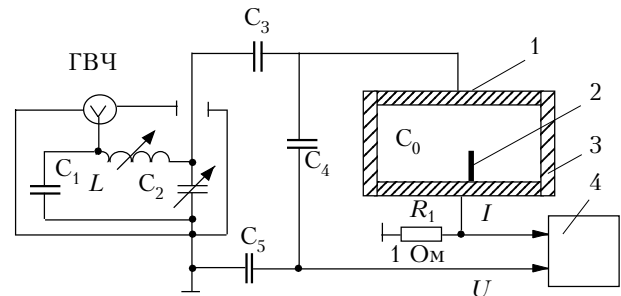


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Разрядная камера представляет собой отрезок цилиндрической кварцевой трубы (3) длиной 50 мм и диаметром 120 мм, закрытый с торцов плоскими дюралюминиевыми потенциальным (1) и заземленным (2) электродами равной площади, которые образуют конденсатор с емкостью (в отсутствие разряда)  $C_0$ .

Система откачки камеры состоит из форвакуумного насоса 2НВР-5Д, обеспечивающего предельный вакуум  $10^{-3}$  Тор. Давление в камере регулируется путем изменения скорости откачки насоса, а также путем изменения величины напуска газа и измерялось при помощи вакуумметра РВТ-1М.

Система ВЧ-возбуждения разряда включает промышленный генератор ГВЧ (13,56 МГц, 500 Вт) и согласующее устройство, состоящее из конденсаторов  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  и индуктивности  $L$ . Согласующее устройство представляет собой резонансный колебательный П-контур и обеспечивает согласование фиксированного омического (в нашем случае 75 Ом) выходного сопротивления генератора с комплексным сопротивлением нагрузки по модулю и фазе.

Диагностические средства установки включают емкостный делитель  $C_4C_5$ , подключенный параллельно камере, безындуктивный резистор  $R_1$ , включенный с камерой последовательно, а также фазометр (4) типа ФК-2-12, формирующий на своем выходе сигнал, пропорциональный амплитуде напряжения  $U_0$  на конденсаторе  $C_0$ , тока через конденсатор  $I_0$  и сдвигу фаз между ними.

С целью экономии дорогостоящих газов эксперименты проводились в воздушной среде, поскольку суть явления не зависит от вида газа.

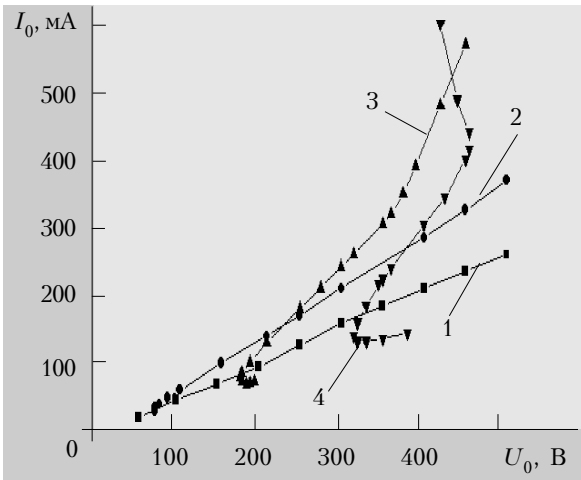


Рис. 2. Зависимость амплитуды полного ВЧ-тока через разряд от разрядного напряжения: 1 –  $P=0,01$  Тор; 2 –  $0,1$  Тор; 3 –  $1$  Тор; 4 –  $P=4,5$  Тор

На рис. 2 приведены полученные зависимости  $I_0(U_0)$  для различных значений давления газа. Здесь видно, что при  $P=4,5$  Тор в области ВЧ-напряжений  $U_0 \approx 400$  В наблюдается увеличение ВЧ-тока разряда, сопровождающееся снижением ВЧ-напряжения. Это говорит о переходе разряда в  $\gamma$ -режим. При более низких давлениях ( $10^{-1}$ – $10^{-2}$  Тор) такое явление не наблюдается, что соответствует  $\alpha$ -режиму разряда [5].

На рис. 3 показаны зависимости омического сдвига фазы  $\Delta\phi=90^\circ-\phi$  разрядного тока от  $U_0$  при различных давлениях.

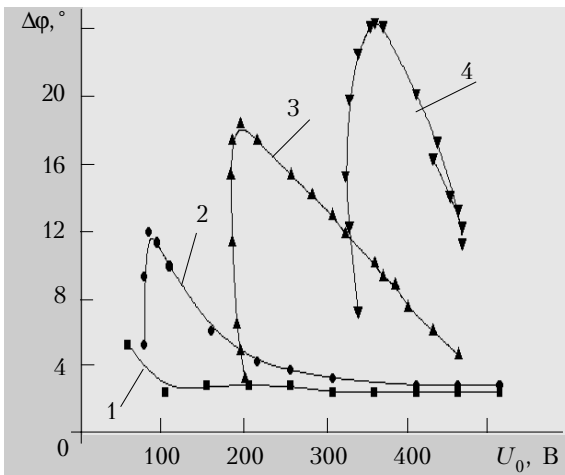


Рис. 3. Отклонение фазы разрядного тока от  $-90^\circ$  при различных давлениях газа: 1 –  $P=0,01$  Тор; 2 –  $0,1$  Тор; 3 –  $1$  Тор; 4 –  $P=4,5$  Тор

По измеренным значениям амплитуды  $I_0$  и фазы  $\phi$  разрядного тока можно рассчитать абсолютные значения компонент комплексного импеданса плазмы в конденсаторе  $C_0$ . Расчеты проводились для параллельной эквивалентной  $R_p^{\parallel} C_p$  цепочки (рис. 4), в

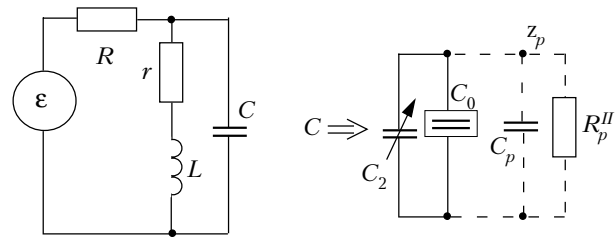


Рис. 4. Эквивалентная схема согласующего устройства и импеданса плазмы разряда

$z_p$ ,  $C_p$  и  $R_p^{\parallel}$  – соответственно импеданс, собственная емкость и эквивалентное параллельное сопротивление разряда

виде которой представим разряд для объяснения его влияния на контур [7]. Собственную емкость  $C_p$  можно рассчитать, зная емкость  $C_k$  конденсатора с разрядом. Величина  $C_k$  равна сумме  $C_0+C_p$ , а следовательно,  $C_p=C_k-C_0$ :

$$C_k = \frac{\sqrt{I_0^2 - I_{0\Omega}^2}}{U_0 \omega} = \frac{I_0 \sin \phi}{\omega U_0} = \frac{I_0 \cos \Delta\phi}{\omega U_0}, \quad (1)$$

где  $I_{0\Omega} \equiv I_0 \cos \phi_{0\omega} \equiv I_0 \cos \phi$ ;  $\omega$  – частота поля.

На рис. 5 приведены зависимости собственной емкости разряда от ВЧ-напряжения для различных давлений газа. Следует отметить, что для  $P=4,5$  Тор здесь так же, как и для зависимости  $I_0(U_0)$ , наблюдается участок с отрицательным наклоном. Собственная емкость разряда  $C_p$  вносит расстройку в резонансный согласующий контур, предварительно настроенный в резонанс. Степень реакции контура при этом определяется формой его резонансного пика, характерной для каждой конкретной системы.

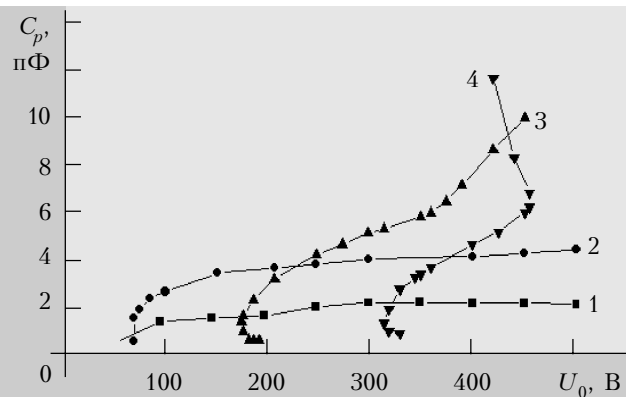


Рис. 5. Зависимость собственной емкости плазмы разряда от разрядного напряжения при различных давлениях газа:

1 –  $P=0,01$  Тор; 2 –  $0,1$  Тор; 3 –  $1$  Тор; 4 –  $P=4,5$  Тор

Для устройства, которое использовалось в работе, были экспериментально измерены зависимости напряжения в контуре  $U_0$  от величины емкости контура  $C$  вблизи резонансного значения  $C^*$ . На рис. 6 показаны резонансные пики  $U_0(\Delta C)$  для различных значений ВЧ э. д. с. генератора ( $\epsilon$ ). Ширина резонансного пика зависит от внутреннего сопротивления  $R$  источника ВЧ э.д.с. генератора. В этом легко убедиться путем расчета электрической схемы, показанной на рис. 4.

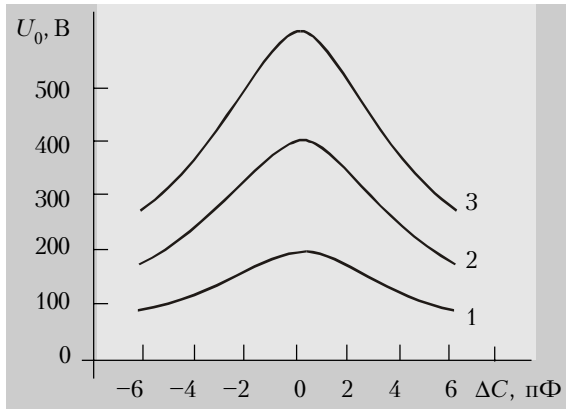


Рис. 6. Резонансные кривые напряжения в контуре: 1 –  $\epsilon=200$  В; 2 –  $\epsilon=400$  В; 3 –  $\epsilon=600$  В

Зная величину полного комплексного выходного тока  $I$  генератора, имеем:

$$\epsilon = I \left( R + \frac{i\omega L - r\omega^2 LC}{1 - \omega^2 LC + i\omega r C} \right). \quad (2)$$

Пусть  $C = C^* \pm \Delta C$ , где  $\Delta C$  – величина емкостной расстройки контура.

С учетом того, что  $\Delta C \ll C$ ,  $r \ll (i\omega L)$ ,  $\omega^2 LC^* = 1$ , формула (2) примет вид

$$\epsilon \approx I \left( R + \frac{i\omega L}{r i \omega C^* - \omega^2 L \Delta C} \right). \quad (3)$$

Тогда для величины полного тока следует выражение:

$$I = \frac{\epsilon}{R + \left( \frac{r C^*}{L} + i\omega \Delta C \right)^{-1}}. \quad (4)$$

Поскольку для напряжения на контуре есть соотношение  $U = \epsilon - IR$ , окончательно получаем формулу для амплитуды напряжения на конденсаторе, которая описывает резонансный пик напряжения в контуре:

$$U_0 \approx \frac{\epsilon_0}{\sqrt{1 + R^2 \omega^2 \Delta C^2}}, \quad (5)$$

где учтено, что сопротивление потерь в контуре  $r$  много меньше чем  $R$ , а  $\epsilon_0$  – амплитуда комплексной ВЧ э.д.с.

Сравнение расчетов по формуле (5) с экспериментальными кривыми на рис. 6 показывает, что для нашей установки внутреннее сопротивление источника ВЧ э.д.с., соответствующее выходу из согласующего устройства, составляет около 2 кОм, а не 75 Ом, как непосредственно на выходе генератора, что и отражает функцию согласующего устройства как трансформатора сопротивления [7].

Как хорошо видно из рис. 3, в ВЧ-токе через разряд существенно преобладает емкостная составляющая (т. е.  $\varphi \approx -90^\circ$ ). Это означает, что именно собственная емкость плазмы является главной составляющей комплексного сопротивления разряда, а ее величина и характер зависимости от параметров плазмы и определяют, в итоге, обратное воздействие ВЧЕР на резонансный контур согласующего устройства.

Емкость контура  $C$  состоит из емкости переменного конденсатора  $C_2$  и емкости  $C_0$  "пустого" (без плазмы) плазменного конденсатора. В отсутствие разряда напряжение в контуре соответствует установившемуся значению  $\epsilon_0$  и емкости  $C = C_2 + C_0$ . В контуре, предварительно настроенном в резонанс, т. е.  $C_2 + C_0 = C^*$ , возникновение плазмы в конденсаторе вызывает емкостную расстройку, равную собственной эквивалентной емкости разряда  $C_p$ . Емкость  $C_p$ , в свою очередь, является функцией параметров плазмы и напряжения  $U_0$  между электродами. Результирующее состояние системы "ВЧ-контур – разряд", устанавливающееся после возникновения плазмы в конденсаторе, соответствует точке  $A$  пересечения кривых  $U_0(\Delta C)$  и  $C_p(U_0) = \Delta C$  на рис. 7. Значения  $C_p$  на рисунках отложены относительно оси  $C = C^*$ .

На рис. 7, а показано явление расстройки контура ВЧЕ-разряда при давлении  $10^{-2}$  Торр, т. е. когда зависимость собственной емкости разряда  $C_p$  от напряжения  $U_0$  очень слаба (кривая 2 почти вертикальна). Изменение емкости приводит к взаимному перемещению кривых 1 и 2, а также перемещению точки их пересечения  $A$ , соответствующей состоянию разряда в контуре. Из рисунка хорошо видно, что уменьшив емкость  $C_2$  на величину  $\Delta C$ , можно сместить кривую 2 в положение 2', когда точка пересечения  $A$  окажется в максимуме резонансной кривой напряжения. Этому случаю соответствует оптимальное согласование генератора с нагрузкой, а также отсутствие скачков в системе "генератор – разряд", т. к. точка пересечения только одна.

При давлении 1 Торр собственная емкость плазмы быстро возрастает с увеличением напряжения  $U_0$  (рис. 7, б) и в случае достаточно узкого резонансного пика кривая 2 может иметь не одну, а три (в предельном случае – две) точки пересечения с резонансной кривой 1 ( $A', N, M$ ). Это произойдет, если после возникновения разряда (т. А) уменьшить емкость переменного конденсатора в контуре на соответствующую величину. При дальнейшем уменьшении  $C_2$  (и смещении кривой 2 влево) произойдет отрыв точки  $A'$  от вершины резонансного пика и система "контур – разряд" скачком переключится в состояние, соответствующее точке  $M$ . Интенсивность разряда (и напряжение) при этом резко снизится, а в контуре, находящемся перед этим вблизи резонанса, возникает значительная расстройка. Если падение  $U_0$  окажется достаточным большим, разряд может даже исчезнуть совсем. Точке  $N$ , как следует из теории [12], отвечает неустойчивое состояние системы, поэтому физически она не реализуется.

Наиболее интересным, с точки зрения согласования, является режим при давлениях выше 3 Торр, когда при повышении ВЧ-напряжения реализуется  $\gamma$ -режим разряда. Функция  $C_p(U_0)$  в этих условиях становится неоднозначной, поскольку при переходе разряда в  $\gamma$ -режим наблюдается снижение разрядного напряжения, а у зависимости параметров плазмы от  $U_0$  (в том числе и у  $C_p$ ) возникает участок с отрицательным наклоном (рис. 7, в). Небольшому снижению напряжения  $U_0$  на этом участке соответствует значительный рост плотности плазмы, мощности в разряде, а также увеличение собственной

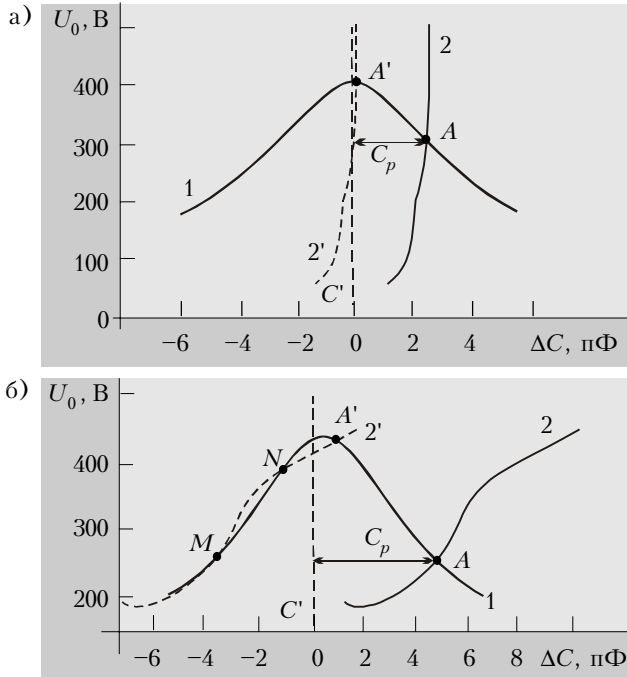
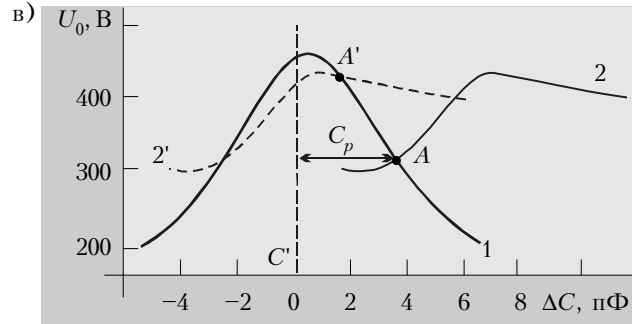


Рис. 7. Поведение системы "резонансный контур – ВЧЕ-разряд":

*a* –  $P=10^{-2}$  Тор; *б* –  $P=1$  Тор; *в* –  $P=4,5$  Тор

1 –  $U_0(\Delta C)$ ; 2 –  $C_p(U_0)$



эквивалентной емкости. Быстрый рост  $C_p$  здесь приводит к тому, что в режиме, описываемом кривой 2', уменьшение емкости  $C_2$  приводит не к уменьшению, а к увеличению емкостной расстройки и суммарной емкости в контуре.

Реальные ВЧЕ-системы существенно отличаются как формой резонансного пика  $U_0(C)$ , так и относительной величиной собственной емкости плазмы  $C_p/C_0$ . Ширина резонансного пика зависит от добротности контура согласующего устройства, а также от внутреннего сопротивления источника ВЧ э.д.с. (генератора). Величина  $C_p/C_0$ , в свою очередь, существенно зависит от расстояния между электродами. Поэтому в разных устройствах описанные явления проявляются в различной степени. Тем не менее, для каждого конкретного случая легко получить количественные оценки для данных эффектов.

\*\*\*

Таким образом, проведенный выше анализ показал, что скачки интенсивности разряда в ВЧ газоразрядных системах могут наблюдаться не только в связи с переключением его из  $\alpha$ - в  $\gamma$ -режим, когда давление газа велико, но и при меньших давлениях газа и разрядных напряжениях. Также очевидно, что скачки интенсивности – это не внутреннее свойство разряда, а следствие устройства электрической цепи и определенного алгоритма ее регулировок. Как видно из приведенных выше данных, в  $\alpha$ -режиме разряда существует возможность вообще устранить скачки в системе.

Приведенные результаты можно использовать при разработке эффективного алгоритма настройки автоматического согласующего устройства промышленных установок.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Левитский С. М. Потенциал пространства и распыление электродов в ВЧ разряде // ЖТФ. – 1957. – Т. 28, №5. – С. 1001–1009.

2. Швец О. М., Тарасенко В. Ф., Овчинников С. С., Толок В. Т. Ввод высокочастотной мощности в плазму, находящуюся в металлической камере // Физика плазмы и проблемы управляемого термоядерного синтеза. – 1963. – Вып. 3. – С. 117–124.

3. Butler H. S., Kino G. S. Plasma sheath formation by rf fields // The Physics of Fluids. – 1963. – Vol. 6, N 9. – P. 1346–1355.

4. Годяк В. А., Кузовников А. А., Савинов В. П. и др. О стационарных полях в ВЧ разрядах низкого давления // Вестн. МГУ. Физика. Астрономия. – 1968. – № 2. – С. 126–127.

5. Яценко Н. А. Связь высокого постоянного потенциала плазмы с режимом горения ВЧ емкостного разряда среднего давления // ЖТФ. – 1981. – Т. 51, вып. 6. – С. 1195–1201.

6. Райзер Ю. П., Шнейдер М. Н. Структура приэлектродных слоев ВЧ разряда и переход между двумя его формами // Физика плазмы. – 1987. – Т. 13, вып. 4. – С. 471–479.

7. Norstrom H. Experimental and design information for calculating impedance matching networks in rf sputtering and plasma chemistry // Vacuum. – 1979. – Vol. 10. – P. 341–350.

8. Bletzinger P., Flemming M. J. Impedance characteristics of an rf parallel plate discharge and validity of a simple circuit model // J. Appl. Phys. – 1987. – Vol. 62, N 12. – P. 4688–4695.

9. Roosmalen van A. J., Hoek van den W. G. M., Kalter H. Electrical properties of planar rf discharges for dry etching // J. Appl. Phys. – 1988. – Vol. 58, N 2. – P. 653–658.

10. Maniv S. Modeling for rf discharge characteristics // J. Appl. Phys. – 1988. – Vol. 63, N 4. – P. 1022–1031.

11. Будянский А. М. Нелинейные явления в цепи ВЧЕ разряда // Тез. докл. Всесоюз. совещания "ВЧ разряд в волновых полях". – Куйбышев, 1989. – С. 42.

12. Андронов А. А., Витг А. А., Хайкин С. З. Теория колебаний. – М.: Мир, 1981.