

04;09;12

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ РАСПЫЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ НА БАЗЕ КОМБИНИРОВАННОГО ВЧ ИНДУКЦИОННО-ЕМКОСТНОГО РАЗРЯДА

© С.В.Дудин, А.В.Зыков, К.И.Положий

Высокая плотность плазмы ($10^{10}-10^{12}$ см⁻³), низкая энергетическая цена иона η ($\eta \leq 100$ Вт/А = 100 В/ион), возможность устойчивой работы при низких давлениях ($10^{-4}-10^{-3}$ Тор) в отсутствие накаливаемых элементов и магнитных полей являются преимуществами ВЧ индукционного разряда (ИР) как плазмообразующей ступени ионно-плазменных технологических систем, в частности распылительных систем (РС) [1,2]. В таких системах (например, односеточный ВЧ источник ионов для травления поверхностей твердых тел [3] или устройства напыления тонких пленок перераспылением твердотельной мишени [4]) для ускорения ионов, образованных в объеме ИР, обычно используют напряжение автосмещения, возникающее между двумя электродами разных площадей, к которым приложено ВЧ напряжение [5]. При этом в технологических РС из конструктивных и экономических соображений целесообразно использовать общие ВЧ генератор и систему согласования для подвода мощности к индуктору и к электродам. В этом случае исключается взаимовлияние двух генераторов, а перераспределение мощности между индуктором и электродами при изменении ВЧ напряжения происходит автоматически. При конструировании таких РС возникает необходимость в целенаправленном выборе параметров системы с тем, чтобы добиться максимального энерговклада в распыляемый электрод-мишень или в пучок источника ионов.

Описанная система с общим ВЧ генератором является, по сути, единым комбинированным индукционно-емкостным разрядом (ИЕР). Несмотря на то что в последние годы появилось большое количество работ, посвященных физике ИР [6,7] и приэлектродных слоев [8,9], а также патентов [10,11], комбинированный ИЕР остается практически неисследованным, а имеющихся данных оказывается недостаточно для решения задачи энергетической оптимизации возникающей при конструировании РС.

Целью настоящей работы является теоретическое исследование распределения мощности в РС на базе комбинированного ИЕР и нахождение соотношения параметров системы, оптимального по энерговыкладу на мишень и скорости распыления.

В результате исследований была построена феноменологическая модель энергодбаланса в ИЕР. Границы применимости модели определяются следующими условиями.

1. Рассматривается диапазон низких давлений ($\leq 10^{-3}$ Тор), являющийся предпочтительным для РС. В этом диапазоне можно приближенно считать, что а) движение ионов и распыленных частиц является бесстолкновительным; б) скорость ионизации постоянна по объему, что обуславливает однородность тока ионов j на поверхность газоразрядной камеры (ГРК).

2. Внутреннюю поверхность ГРК составляют только поверхности двух электродов, а площади других поверхностей, граничащих с плазмой, пренебрежимо малы.

3. Считаем плазму достаточно плотной, а падение напряжения на приэлектродных слоях толщиной d — достаточно низкими, так что $d \ll L$, где L — характерный размер ГРК (например, при $L \sim 10$ см и $U \sim 1000$ В должно быть $j > 0.2$ мА/см²).

4. Ионы ускоряются квазистационарным средним по времени падением потенциала в приэлектродном слое, т.е. время пролета ионом приэлектродного слоя много больше периода поля. Это условие накладывает ограничение на рабочую частоту f (при $d \sim 1$ см и $U \sim 1000$ В должно быть $f > 3$ МГц).

Основой модели являются следующие положения. Плазма локализована в ГРК, состоящей из двух электродов с площадями S_1 и S_2 ($S_1 < S_2$, $S_1 + S_2 = S_0$). Пренебрегая потерями в электрических цепях, распределение подводимой мощности P_0 можно представить, как $P_0 = P_1 + P_2 + P_i$, где $P_1 = jS_1U_1$ и $P_2 = jS_2U_2$ — мощности, затрачиваемые на ускорение потоков ионов на меньший и больший электроды соответственно (U_1 и U_2 — средние по времени падения потенциалов в приэлектродных слоях), $P_i = jS_0\eta$ — мощность, затрачиваемая на образование ионов. Смещения U_1 и U_2 выразим через амплитуды приложенных к приэлектродным слоям ВЧ напряжений φ_1 и φ_2 : $U_1 = \varphi_1 + \varphi_{pl}$, $U_2 = \varphi_2 + \varphi_{pl}$, где φ_{pl} — добавка, учитывающая ненулевой потенциал плазмы в отсутствие ВЧ смещения. Согласно [8,9], φ_1 и φ_2 связаны соотношениями: $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2$ и $\varphi_1/\varphi_2 = (S_2/S_1)^\alpha$, где φ — амплитуда ВЧ напряжения, прикладываемого между электродами, $\alpha = 4$ для бесстолкновительного режима движения ионов, когда применим закон Чайльда-Ленгмюра [8,9].

Введя безразмерные переменные $\delta = S_2/S_1$, $p_i = P_i/P_0$, $p_1 = P_1/P_0$, $p_2 = P_2/P_0$, $x = \varphi/\eta$, $y = \varphi_{pl}/\eta$ и используя приведенные выше соотношения, легко получить следующие аналитические выражения для безразмерных мощностей:

$$p_i = \frac{1}{1 + \gamma(\delta)x + y}; \quad p_1 = \frac{1}{1 + \gamma(\delta)x + y} \left[\frac{\delta^4}{1 + \delta^4} x + y \right] \frac{1}{1 + \delta};$$

$$p_2 = \frac{1}{1 + \gamma(\delta)x + y} \left[\frac{1}{1 + \delta^4} x + y \right] \frac{\delta}{1 + \delta},$$

где

$$\gamma(\delta) = \frac{\delta(\delta^2 - \delta + 1)}{1 + \delta^4}.$$

Отметим, что P_1 можно расценивать как полезную часть подводимой мощности или, в безразмерном виде, как КПД системы. Распределение мощности в зависимости от параметра δ представлено на рис. 1, а. Обращает на себя внимание наличие максимума в зависимости p_1 от δ , положение которого зависит от φ , т.е. для каждого значения φ существует оптимальное значение δ , при котором КПД максимален. Зависимости оптимального δ и максимального КПД от φ приведены на рис. 1, б. Этот график может быть непосредственно использован при разработке РС. Задавшись требуемой величиной φ (при $\varphi > 100$ В и $\delta > 1.5$), φ практически совпадает с ускоряющим напряжением U_1), с его помощью можно найти оптимальное отношение площадей электродов, а затем, используя требуемые значения площади мишени и плотности тока, а также КПД в оптимуме, по рис. 1, б найти необходимую мощность генератора $P_0 = \varphi j S_1 / p_{1 \max}$.

Из результатов, не показанных на графиках, упомянем монотонный рост p_1 и монотонное снижение p_i при росте φ . При $\delta \rightarrow \infty$ p_1, p_2, p_i выходят на насыщение, причем $p_1 \rightarrow 0$, а асимптотические значения p_i и p_2 можно интерпретировать так затраты мощности на создание и удержание плазмы чисто индукционного разряда, определяемые параметрами η и φ_{pl} соответственно.

Для оптимизации РС по скорости распыления описанная модель была дополнена экспериментальной зависимостью коэффициента распыления меди от энергии бомбардирующих ионов аргона [12]. Результаты расчета скорости распыления, нормированной на единицу удельной подводимой мощности $W = v/(P_0/S_1)$ (v — скорость распыления), представлены на рис. 2. На графике хорошо виден максимум скорости распыления, который достигается при $\varphi \approx 500$ В и $\delta \approx 1.8$. Эти параметры являются оптимальными для РС во всей области применимости настоящей модели.

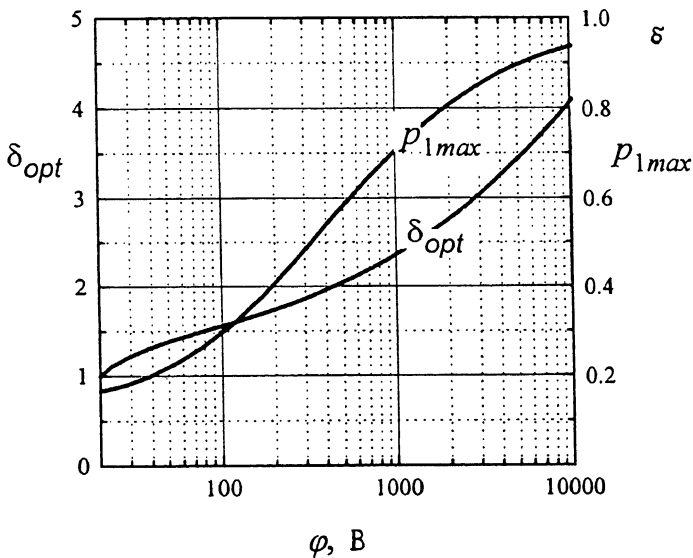
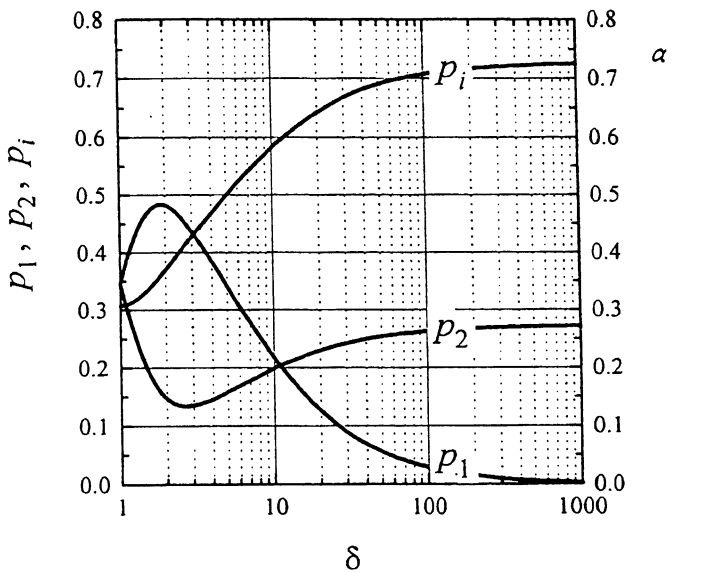


Рис. 1. Зависимости безразмерных мощностей p_1, p_2, p_i от отношения площадей электродов $\delta = S_2/S_1$ при $\varphi = 300$ В (а) и зависимость оптимальной величины δ_{opt} и максимального КПД p_{1max} от амплитуды ВЧ напряжения между электродами (б). В качестве параметров η и φ_{pl} взяты типичные экспериментальные значения $\eta = 80$ Вт/А; $\varphi_{pl} = 30$ В.

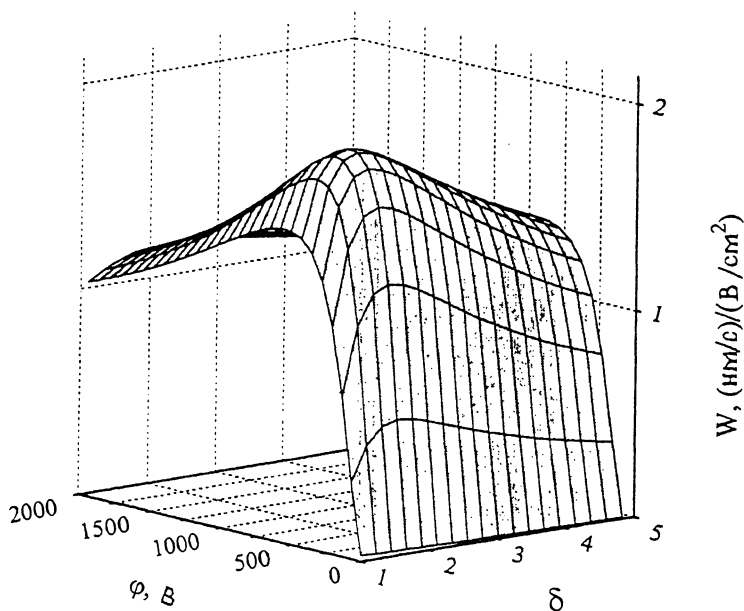


Рис. 2. График зависимости нормированной скорости распыления медной мишени ионами аргона от параметров δ и φ : $\eta = 80$ Вт/А; $\varphi_{pl} = 30$ В.

Таким образом, в настоящей работе теоретически изучено распределение мощности в РС на базе ИЕР, установлен факт существования оптимального соотношения площадей электродов, при котором энерговклад в мишень максимален, и рассчитаны зависимости этого соотношения от внешних параметров. Рассчитаны также параметры системы, оптимальные по скорости распыления. Теоретические выводы имеют универсальный характер и применимы вне зависимости от абсолютных величин подводимой мощности и размера мишени. Полученные результаты могут быть непосредственно использованы при конструировании РС на базе ИЕР, а также могут быть полезными для дальнейшего развития физических моделей газоразрядных систем.

В заключение отметим, что в данной работе используется приближение постоянной энергетической цены иона ($\eta = \text{const}$). В то же время в общем случае η является функцией давления, потенциала φ и т.д. Экспериментальная проверка влияния указанных факторов на энергобаланс и уточнение теоретической модели является целью дальнейших исследований авторов.

Список литературы

- [1] *Габович М.Д.* Физика и техника плазменных источников ионов. М.: Атомиздат, 1972.
- [2] *Плазменная технология в производстве СВИС / Под ред. Н. Айнспрука и Д. Брауна.* М.: Мир, 1987.
- [3] *Будянский А.М., Зыков А.В., Фареник В.И.* Высокочастотный источник ионов // Патент Украины № 2426. Патент РФ № 1570549 от 28.06.93.
- [4] *Astussen Jes* // J. Vac. Sci. Technol. 1989. A7(3). P. 883.
- [5] *Райзер Ю.П., Шнейдер М.Н.* // Физика плазмы. 1992. Т. 18. В. 9. С. 1211.
- [6] *Hopwood J.A.* // Plasma Sources Sci. Technol. 1992. V. 1. P. 109.
- [7] *Turner M.M.* // Phys. Rev. Lett. 1993. V. 71. P. 1844.
- [8] *Lieberman M.A.* // J. Appl. Phys. 1986. V. 65. P. 4186.
- [9] *Будянский А.М.* // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. В. 1. С. 17.
- [10] *Ogle J.S.* US Patent 4948458. 1990.
- [11] *Coultas D.K., Keller J.H.* European Patent. Publication N 0379828 A2. 1990.
- [12] *Распыление твердых тел ионной бомбардировкой: Физическое распыление одноэлементных твердых тел / Под ред. Р. Бериша.* М.: Мир, 1984. 336 с.

Харьковский государственный
университет

Поступило в Редакцию
13 июня 1996 г.

