

02;04;12

## Энергетическая цена иона в комбинированном индукционно-емкостном ВЧ разряде

© С.В. Дудин, А.В. Зыков, К.И. Положий, В.И. Фареник

Харьковский государственный университет  
Научный физико-технологический центр, Харьков

Поступило в Редакцию 11 ноября 1997 г.

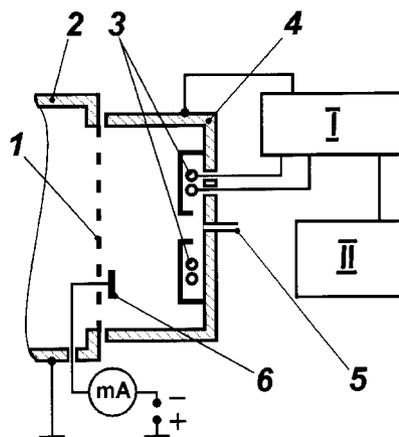
Экспериментально измерены зависимости энергетической цены иона  $\eta$  от параметров комбинированного ВЧ индукционно-емкостного (ВЧИЕ) разряда при низких давлениях ( $p < 10^{-2}$  Торг). Установлено, что  $\eta$  не зависит от подводимой мощности, существует минимум  $\eta$  в зависимости по давлению, а также обнаружен эффект снижения  $\eta$  при подаче ВЧ потенциала на электроды. Полученные результаты позволили найти параметры системы, оптимальные с точки зрения энергетической эффективности ионообразования, и могут быть полезными для уточнения теоретических моделей комбинированного ВЧИЕ разряда.

В настоящее время ВЧ индукционный разряд (ИР) получил широкое распространение в качестве плазмообразующей ступени разнообразных ионно-плазменных технологических систем (ИПС) [1–4]. В таких системах для ускорения ионов из плазмы ИР на обрабатываемую поверхность часто используется постоянный потенциал автосмещения, возникающий на электродах, к которым приложено ВЧ напряжение [5]. В этом случае газовый разряд сочетает в себе как объемный характер процессов в безэлектродном ИР, так и существенную роль приэлектродных слоев, что свойственно для разряда емкостного типа, и фактически представляет собой комбинированный ВЧ индукционно-емкостный (ВЧИЕ) разряд [6]. Несмотря на большое количество работ, посвященных физике ИР [7,8] и приэлектродных слоев [9,10], а также патентов [11,12], комбинированный ВЧИЕ разряд остается практически неизученным. Исследованию этого разряда посвящена работа [6], в которой рассматривалось распределение мощности при низком давлении и найдено соотношение параметров системы, оптимальное по энергозатратам в

поток ионов на мишень. В этой работе использовалось приближение постоянной энергетической цены иона  $\eta$ , хотя известно, что эта величина зависит от параметров разряда [13]. Экспериментальное измерение таких зависимостей для ВЧИЕ разряда низкого давления и являлось целью настоящей работы.

Разные авторы, в зависимости от поставленной задачи, по-разному определяют энергетическую цену иона. Так, в теоретических работах (см., например, [9]) эта величина характеризует суммарные потери энергии электронами в результате упругих и неупругих столкновений при образовании одного иона в объеме разряда. В технических приложениях, например для источников ионов, энергетическая цена иона определяется как отношение полной подводимой мощности к току ионного пучка [1]. При сравнении эффективности ионообразующих ступеней различных ИПС, как показывает практика, более удобной характеристикой является величина  $\eta = eP_i/I$ , где  $I = \int_S j(\xi)d\xi$  — суммарный ток ионов на стенки газоразрядной камеры (ГРК),  $S$  — площадь поверхности электродов, ограничивающих плазму,  $j$  — плотность тока ионов на границе плазмы, а  $P_i$  — поглощаемая в объеме мощность, которая включает в себя как потери энергии электронов при упругих и неупругих соударениях, так и неизбежные затраты энергии, выносимой потоками заряженных частиц на границу плазмы вследствие их теплового движения.

При таком определении энергетической цены иона величину  $\eta$  для ВЧИЕ разряда легко выразить через непосредственно измеряемые в эксперименте параметры:  $I$ , поглощаемую разрядом мощность  $P_0$ , амплитуду ВЧ напряжения между электродами  $\varphi$  и отношение площадей электродов  $\delta$  ( $\delta > 1$ ). В чисто индукционном разряде  $\varphi = 0$  и  $P_i = P_0$ . При  $\varphi \neq 0$   $P_i = P_0 - P_a$ , где  $P_a$  — затраты мощности на ускорение ионов. Величину  $P_a$ , зависящую от  $\delta$  и  $\varphi$ , можно рассчитать при помощи теоретической модели баланса мощности в ВЧИЕ разряде, представленной в работе [6]. Пользуясь результатами этой работы, легко получить следующее выражение для  $\eta$  в комбинированном ВЧИЕ разряде:  $\eta = \frac{e(P_0 - P_a)}{I}$ , где  $P_a = \gamma(\delta) \cdot \varphi \cdot I$ , а функция  $\gamma(\delta)$  учитывает влияние соотношения площадей ВЧ электродов на распределение мощности в разряде. В случае низких давлений, когда для тока положительных ионов в ВЧ приэлектродных слоях выполним закон "степени 3/2" [14,15], соотношения напряжений между плазмой и



**Рис. 1.** Принципиальная схема ВЧ источника ионов: *I* — заземленная сетка-электрод, *2* — переходный фланец вакуумной камеры, *3* — экранированный двухвитковый индуктор, *4* — металлический корпус газоразрядной камеры, *I* — согласующее устройство, *II* — генератор высокочастотный, *5* — напуск рабочего газа, *6* — плоский одиночный зонд.

электродами обратно пропорциональны отношению четвертой степени их площадей и  $\gamma(\delta) = \delta(\delta^2 - \delta + 1)/(1 + \delta^4)$  [6].

Эксперименты с целью определения  $\eta$  и ее функциональных зависимостей от параметров ВЧИЕ разряда проводились на технологической установке, оснащенной односеточным источником низкоэнергетичных ионов (ИИ) [3]. Принципиальная схема источника представлена на рис. 1. ВЧ напряжение частотой 13.56 МГц от генератора типа УВ-1 через согласующее устройство (СУ) подавалось как на внутренний экранированный индуктор *3*, так и на цилиндрический корпус ГРК *4*, который одновременно являлся ВЧ электродом. Заземленным электродом системы была сетка *I*. Геометрические размеры ИИ: длина 80 мм, диаметр 250 мм, т.е. для данной конструкции  $\delta \approx 3$ . Диапазон изменения рабочих параметров ИИ был следующим: давление в ГРК  $p = 10^{-4} \div 10^{-2}$  Торр, амплитуда напряжения на ВЧ электроде  $\varphi = 0 \div 500$  В, подводимая ВЧ мощность  $P = 0.2 \div 1$  кВт. Плотность тока ионов  $j$  на стенках ГРК и на сетке измерялась плоским одиночным

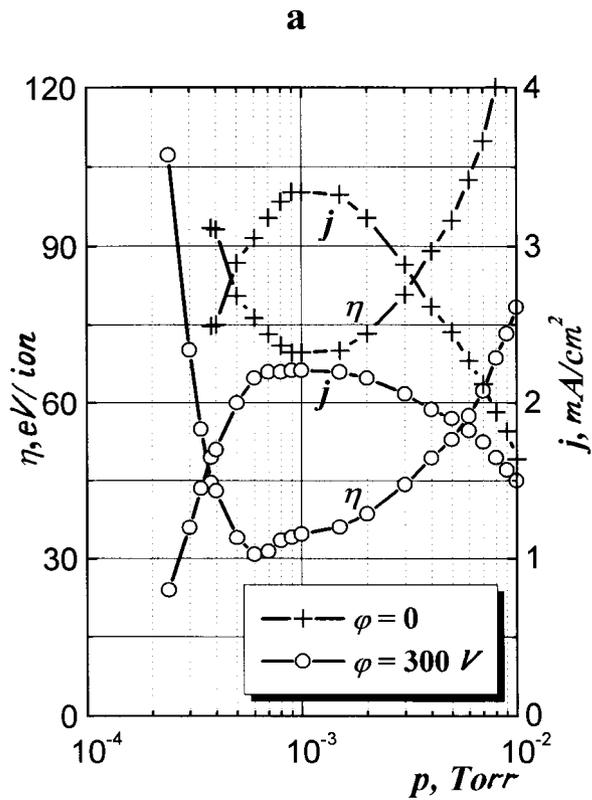
зондом  $b$  в режиме насыщения ионного тока. Измерения распределения плотности тока показали, что при  $p < 10^{-3}$  Торг практически однородна по поверхности плазмы и поэтому при расчетах полагалось  $I = jS$ . Для определения мощности  $P_0$ , вкладываемой непосредственно в разряд ( $P_0 = P - P_{loss}$ ), измерялась мощность электрических потерь  $P_{loss}$  в индукторе и СУ. Энергетическая цена иона вычислялась на основании экспериментальных данных, согласно приведенной выше формуле.

В комбинированном разряде были проведены систематические исследования зависимостей  $\eta$  от  $P_0$ ,  $p$  и  $\varphi$ . В качестве рабочего газа использовался аргон. Применение других сортов газа (воздух, фреон, азот, кислород) не выявило качественных отличий в зависимостях  $\eta$  от  $p$  и  $\varphi$ , изменялась лишь абсолютная величина  $\eta$  (различие не превышало 30%).

Анализ результатов измерений показал, что в режиме ИР ( $\varphi = 0$ ) во всем исследованном диапазоне  $\eta$  не зависит от вкладываемой в разряд мощности ( $j$  пропорциональна  $P_0$ ). В то же время было установлено, что  $\eta$  существенно зависит от давления в ГРК. На рис. 2, *a* представлены результаты экспериментальных измерений  $j$ , а также рассчитанные на их основе значения  $\eta$  в зависимости от  $p$  при различных  $\varphi$ . Характерным для этих зависимостей является наличие минимума  $\eta$  при  $p \sim 10^{-3}$  Торг, или, другими словами, существует диапазон давления, оптимальный по эффективности ионообразования как для ИР, так и для ВЧИЕР.

Указанные результаты для чисто индукционного разряда ( $\varphi = 0$ ) хорошо согласуются с теоретическими расчетами работы [16], проведенными в приближении максвелловской функции распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ). В этом случае поток энергии, выносимой заряженными частицами на стенки ГРК, пропорционален электронной температуре  $T_e$ , зависящей только от давления  $p$  и характерного размера системы  $d$ , то есть  $\eta$  однозначно определяется параметром  $pd$ .

На представленных на рис. 2, *a* графиках также обращает на себя внимание факт снижения величины  $\eta$  при подаче потенциала на ВЧ электрод. Для выяснения закономерностей этого явления при фиксированных  $p$  и  $P_0$  были проведены измерения зависимостей  $\eta(\varphi)$ , результаты которых представлены на рис. 2, *b*. Как видно из графиков, с ростом  $\varphi$  энергетическая цена иона монотонно уменьшается от величины  $\eta \approx 80$  eV/ion в чисто индукционном разряде ( $\varphi = 0$ ) до минимального значения  $\eta \approx 30$  eV/ion при  $\varphi > 300$  V.



**Рис. 2.** Графики зависимостей энергетической цены иона  $\eta$  и плотности тока на зонд  $j$ : *a* — от давления  $p$  в ГРК для чисто индукционного разряда ( $\varphi = 0 \text{ V}$ ) и для ВЧИЕ разряда ( $\varphi = 300 \text{ V}$ ); *b* — от потенциала  $\varphi$  на ВЧ электроде при постоянном давлении в ГРК  $p = 5.5 \cdot 10^{-4} \text{ Torr}$ .  $P_0 = 400 \text{ W}$ .

На основании теоретических моделей ВЧ разряда емкостного типа [17–19] можно предположить, что снижение энергетической цены иона при росте  $\varphi$  обусловлено увеличением доли быстрых электронов в ФРЭЭ. Такое изменение может быть связано либо со стохастическим нагревом электронного газа при его взаимодействии с ВЧ приэлектродными слоями, либо с вкладом омического нагрева в плазменной фазе

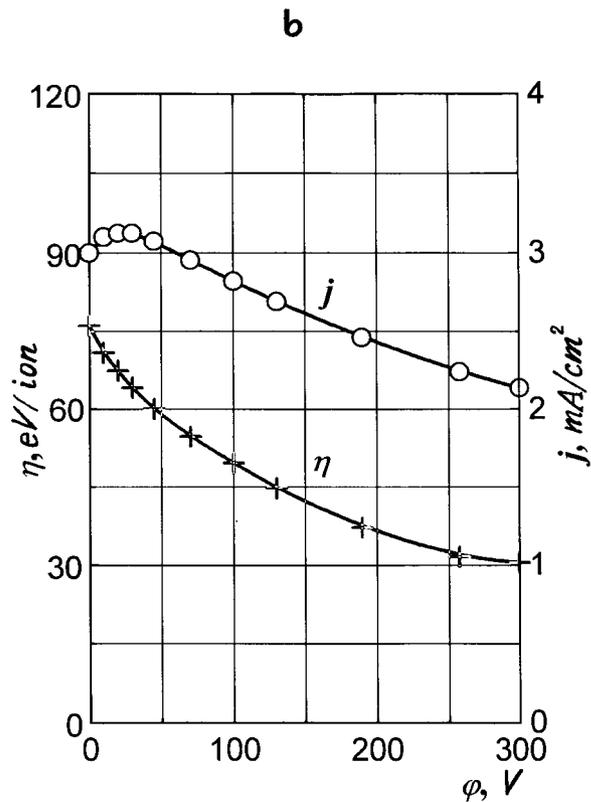


Рис. 2 (продолжение).

емкостного слоя [18]. Однако для окончательных выводов о природе данного явления требуются проведение экспериментальных исследований динамики ФРЭЭ при воздействии на индукционный разряд слабого потенциального ВЧ электрического поля. Авторы планируют провести такие эксперименты в ближайшем будущем.

Таким образом, в настоящей работе экспериментально измерены зависимости энергетической цены иона от параметров комбинированного ВЧ индукционно-емкостного разряда при низких давлениях. Установлено, что  $\eta$  не зависит от подводимой мощности, существует

минимум  $\eta$  в зависимости по давлению, а также обнаружен эффект снижения величины  $\eta$  при воздействии на плазму потенциального ВЧ электрического поля. Полученные результаты позволили найти параметры технологической системы, оптимальные с точки зрения эффективности ионообразования, и получить данные, необходимые для уточнения теоретических моделей комбинированного ВЧИЕ разряда.

## Список литературы

- [1] *Габович М.Д.* Физика и техника плазменных источников ионов. М.: Атомиздат, 1972.
- [2] *Плазменная технология в производстве СБИС* / 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] *Jes Asmussen* // 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] *Дудин С.В., Зыков А.В., Положий К.И.* // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22. В. 19. С. 54–59.
- [7] *Horwood J.A.* // Plasma Sources Sci. Technol. 1992. V. 1. P. 109.
- [8] *Turner M.M.* // Phys. Rev. Lett. 1993. V. 71. P. 1844.
- [9] *Lieberman M.A.* // J. Appl. Phys. 1989. V. 65. P. 4186.
- [10] *Будянский А.М.* // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. В. 1. С. 17.
- [11] *Ogle J.S.* US Patent 4948458. 1990.
- [12] *Coultas D.K., Keller J.H.* European Patent. Publication N 0379828. A2. 1990.
- [13] *Misium G.R., Lichtenberg A.J., Lieberman M.A.* // J. Vac. Sci. Technol. A. 1989. V. 7. P. 1007.
- [14] *Lieberman M.A.* // J. Appl. Phys. 1986. V. 65. P. 4186.
- [15] *Будянский А.М.* // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. В. 1. С. 17.
- [16] *Бондаренко В.Г., Денисов В.П., Еремин Б.Г.* и др. // Физика плазмы. 1991. Т. 17. В. 6. С. 756.
- [17] *Kaganovich I.D., Tsendin L.D.* // IEEE Transactions on Plasma Science. 1992. V. 20. N 2. P. 66–75.
- [18] *Kaganovich I.D., Tsendin L.D.* // IEEE Transactions on Plasma Science. 1992. V. 20. N 2. P. 86–92.
- [19] *Wood B.P., Lieberman M.A., Lichtenberg A.J.* // IEEE Transactions on Plasma Science. 1995. V. 23. N 1. P. 89–96.