

01;04;09

## Кинетика высокочастотного разряда низкого давления с конденсированной фазой

© В.И. Струнин, А.А. Ляхов, Г.Ж. Худайбергенов, В.В. Шкуркин

Омский государственный университет,  
644077 Омск, Россия  
e-mail: strunin@omsu.omskreg.ru

(Поступило в Редакцию 7 июля 2003 г.)

Получена функция распределения электронов по энергиям для ВЧ плазмы низкого давления с присутствием пылевых частиц. Оценено влияние микроскопических образований на электронейтральность плазмы и на энергетическое распределение электронов.

### Введение

Плазменные пылевые частицы часто присутствуют в плазмохимических реакторах [1,2] в результате протекания процессов полимеризации, взаимодействия продуктов плазмохимических реакций со стенками рабочей камеры, катодного распыления. Присутствие конденсированной фазы в устройствах для травления и плазмохимического осаждения приводит к ухудшению качества поверхности стравливаемых образцов и получаемых пленок [3]. Размер частиц при этом может составлять 0.01–100 мкм. Частицы пыли, присутствующие в плазме, имеют отрицательный заряд  $Q_d$ , обусловленный большей подвижностью электронов по сравнению с ионами. Этот заряд может достигать значительной величины и при больших концентрациях микрочастиц существенно влиять на параметры плазмы, в частности, приводить к деформации энергетического распределения электронов [4–6]. Заряд  $Q_d$  и соответствующий ему плавающий потенциал  $\phi_s$  находятся из условия равенства (в отсутствие эмиссии) токов электронов и положительных ионов на каждую пылевую частицу. Соответствующие сечения поглощения можно оценить в приближении лимитационного орбитального движения по известным формулам зондовой теории [7].

### Метод расчета

В данной работе мы рассмотрели влияние пылевых частиц, приобретающих электрический заряд в аргоновой газоразрядной плазме вследствие процессов, описанных выше, на функцию распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ). Пусть все пылевые частицы имеют сферическую форму и одинаковый размер. Тогда потенциал Дебая, экранирующий область вокруг частицы, выражается следующим образом:

$$\phi(r) = \phi_s \frac{a}{r} \exp[-(r-a)/\lambda_L], \quad (1)$$

где дебаевская длина экранирования:

$$\frac{1}{\lambda_L} = \sqrt{\frac{e^2 n}{\epsilon_0} \left( \frac{1}{kT_e} + \frac{1}{2E_0} \right)},$$

где  $\phi_s$  — потенциал на поверхности частицы,  $a$  — радиус пылевой частицы,  $n$  — объемная плотность плазмы,  $E_0$  — средняя энергия ионов.

Заряд пылевой частицы  $Q_d$  связан с ионным и электронным токами через столкновения с пылевыми частицами выражением

$$\frac{dQ_d}{dt} = I_e + I_i. \quad (2)$$

Ток электронов на пылевую частицу может быть описан при помощи соотношения

$$I_e = -\pi a^2 e n_e \int_{-\phi_s}^{\infty} \left( 1 + \frac{e\phi_s}{u} \right) \sqrt{\frac{2u}{m_e}} f \sqrt{u} du, \quad (3)$$

где  $n_e$  — концентрация электронов,  $u$  — кинетическая энергия электронов,  $f$  — функция распределения электронов по энергиям.

Простым и надежным является выражение для ионной компоненты, поскольку ионная функция распределения известна и обычно является максвелловской. Так, ионный ток на пылевую частицу выражается следующим образом:

$$I_i = \pi a^2 e n_i \sqrt{\frac{2E_0}{m_i}} \left( 1 - \frac{e\phi_s}{E_0} \right), \quad (4)$$

где  $n_i$  — объемная плотность ионов.

Плавающий потенциал  $\phi_s$  пылевой частицы связан с зарядом частицы следующим образом:

$$\phi_s = \frac{Q_d}{4\pi\epsilon_0 a}.$$

Учитывая, что  $n_e + n_d Q_d/e = n_i$ , можно получить отношение  $n_e/n_i$  через

$$\frac{n_e}{n_i} = 1 + \frac{n_d Q_d}{n_i e}, \quad (5)$$

где  $n_d$  — плотность пылевых частиц.

Учитывая выражение (1) для потенциала взаимодействия электрона с пылевой частицей, сечение упругого рассеяния электрона на пылевой частице можно записать следующим образом [8]:

$$\sigma_{ed}^e(u) = \pi a^2 \left( \frac{-e\phi_s}{u} \right)^2 \exp(2a/\lambda_L) \ln \Lambda, \quad (6)$$

$$\ln \Lambda \approx \left( \frac{\lambda_L T_e}{a(-e\phi_s)} \right),$$

где  $T_e$  — электронная температура в eV.

Сечения прилипания электронов пылевым частицам запишется так [5]:

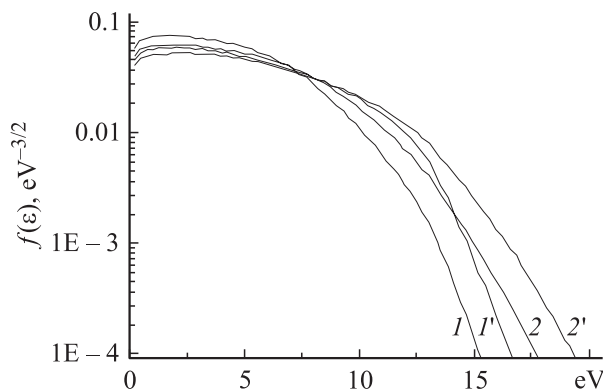
$$\sigma_{ed}^c = \begin{cases} 0, & u < -e\phi_s, \\ \pi a^2 (1 + e\phi_s/u), & u \geq -e\phi_s. \end{cases} \quad (7)$$

Это выражение в явном виде показывает, что только достаточно быстрые электроны могут поглощаться пылевыми частицами.

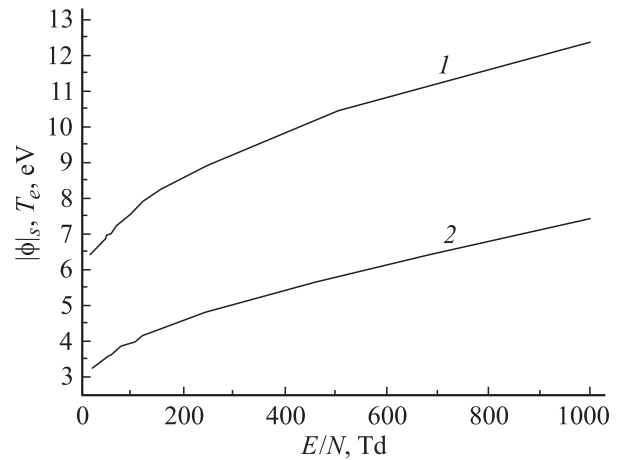
## Результаты и их обсуждение

Проведено моделирование ФРЭЭ аргоновой плазмы ВЧ разряда в присутствии пылевых частиц, а также зарядки пылевой частицы, определяемой выражением (2). На рис. 1 представлены ФРЭЭ для ВЧ плазмы при разных концентрациях пылевых частиц. ФРЭЭ были получены для пылевых частиц  $r_d = 10^{-4}$  см,  $n_d = 3 \cdot 10^7$  см $^{-3}$ . Значение величины коэффициента Таундсена составляло  $E/N = 25$ –1000 Td. Концентрация ионов задавалась параметрически и составляла  $n_i = 3 \cdot 10^{11}$  см $^{-3}$ , концентрация электронов в плазме вычислялась по формуле (5).

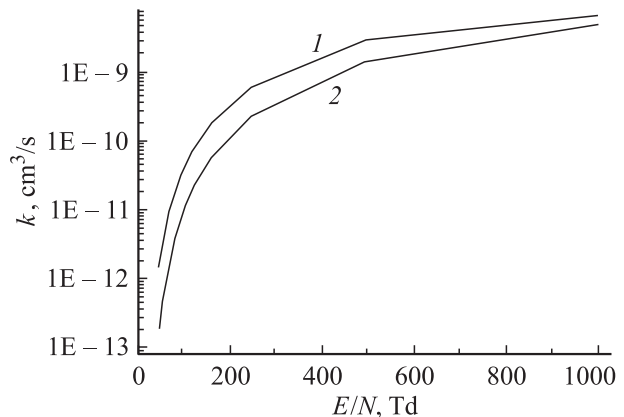
На первом этапе вычислений для пылевых частиц задавался начальный заряд ( $-1$ ), после чего производился расчет ФРЭЭ, по формулам (3), (4) определялись величины ионного и электронного токов на пылевою частицу, заряд рассчитывали из соотношения (2), а



**Рис. 1.** ФРЭЭ в ВЧ разряде в аргоновой плазме. 1, 1' — ФРЭЭ для  $E/N = 50$  Td с КДФ и без КДФ соответственно; 2, 2' — ФРЭЭ для  $E/N = 100$  Td с КДФ и без КДФ соответственно;  $n_d = 3 \cdot 10^7$  см $^{-3}$ .



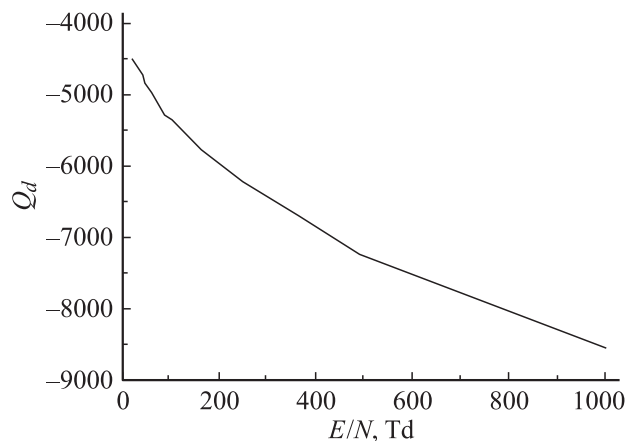
**Рис. 2.** Плавающий потенциал частицы и температура электронов в ВЧ разряде в аргоновой плазме. 1 — плавающий потенциал частицы  $\phi_s$ , 2 — температура электронов  $T_e$ .



**Рис. 3.** Константа скорости ионизации атома аргона в ВЧ плазме. 1 — в отсутствие КДФ, 2 — при наличии КДФ.

равенство токов ( $I_e = I_i$ ) являлось критерием выхода из цикла. Шаг по времени  $\tau = 10^{-12}$  с. Как видно из рис. 1, наличие пылевых частиц в плазме приводит к обеднению высокоэнергетической части функции распределения.

На рис. 2 показаны плавающий потенциал пылевой частицы и температура электронов в ВЧ плазме. Потенциал частицы не зависит от размера частицы и определяется только поверхностными процессами адсорбции электронов и ионов и зависит от электрофизических ( $n_e$ ,  $n_i$ ,  $T_e$ ,  $T_i$ ) и теплофизических параметров плазмы и материала пылевой частицы. Рост значений плавающего потенциала с ростом напряженности электрического поля обусловлен увеличением температуры электронов ( $T_e$ ) и увеличением доли высокоэнергетических электронов в ФРЭЭ. Значение плавающего потенциала частицы примерно на 50% превышает  $T_e$  для тех же значений  $E/N$ , что соответствует оценкам в [8]. Наличие пыли приводит к деформации ФРЭЭ, в результате чего изменяются и другие характеристики разряда. Снижение плотности электронов в высокоэнергетической части ФРЭЭ вслед-



**Рис. 4.** Зависимость заряда пылевой частицы  $Q_d$  от величины приложенного поля  $E/N$ .

ствие прилипания быстрых электронов к частицам пыли, например, приводит к снижению константы скорости ионизации аргона (рис. 3) в присутствии частиц пыли, при этом заряд пылевой частицы может достигать  $10^3$  зарядов электронов (рис. 4). Это приведет к нарушению условия самоподдержания разряда, и потребуются увеличение скорости ионизации. Это приводит к необходимости увеличения напряженности электрического поля (или вводимой в разряд мощности) для поддержания разряда.

Таким образом, из результатов оценки влияния пылевых частиц на ФРЭЭ, а следовательно на значения кинетических коэффициентов процессов, протекающих с участием электронов и ионов, и на условия поддержания газовых электрических разрядов, следует необходимость учета этих эффектов при моделировании плазмохимических реакций.

## Список литературы

- [1] Цытович В.Н. // УФН. 1997. Т. 167. С. 57–99.
- [2] Piel A., Melzer A. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2002. Vol. 44. P. 1–26.
- [3] Siefert W. // Thin Solid Films. 1984. Vol. 120. P. 267–274.
- [4] McCaughey M., Kushner M. // J. Appl. Phys. 1991. Vol. 69. P. 6952–6960.
- [5] Choi S., Kushner M. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1994. Vol. 22. P. 138–149.
- [6] Voef J. // Phys. Rev. 1992. Vol. A46. P. 7910–7922.
- [7] Демидов В., Колоколов Н., Кудрявцев А. Зондовые методы исследования низкотемпературной плазмы. М.: Энергоатомиздат, 1996. 238 с.
- [8] Wang D., Dong J. // J. Appl. Phys. 1997. Vol. 81. P. 38–42.