

04;09
©1994

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ ПО ЭНЕРГИИ ПРИ СВЧ ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКЕ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Р.К.Яфаров, А.А.Назаров

Важным фактором, определяющим механизмы процессов, протекающих в неизотермической низкотемпературной плазме газового СВЧ разряда в магнитном поле, является характер распределения электронов по энергии. Благодаря своей малой массе и высокой подвижности они принимают на себя практически всю энергию от высокочастотного электрического поля и далее расходуют ее на диссоциацию, возбуждение, ионизацию или разогрев нейтральных частиц, определяя тем самым вид и скорость химических превращений. Например, скорость генерации энергетических и химически активных частиц в плазме разряда при диссоциации молекул рабочего газа электронным ударом определяется выражением [1]

$$G = k(\bar{\varepsilon})n_e n_r,$$

где n_e , n_r — соответственно концентрация электронов и молекул газа, из которых образуются энергетические и химически активные частицы; $k(\bar{\varepsilon})$ — константа скорости реакции, определяемая выражением

$$k = \left(\frac{2}{m}\right)^{1/2} \int_{E_{\text{пор}}^{\text{дис}}}^{\infty} \sigma_{\text{дис}}(\bar{\varepsilon}) f(\varepsilon) \varepsilon^{1/2} d\varepsilon.$$

Здесь m — масса электрона, $\sigma_{\text{дис}}(\bar{\varepsilon})$ — сечение диссоциации; $f(\varepsilon)$ — функция распределения электронов по энергиям ($\Phi R \Delta \Delta$); $E_{\text{дис}}^{\text{пор}}$ — пороговая энергия процесса образования энергетических и химически активных частиц вследствие ударов электронов.

Определение $\Phi R \Delta \Delta$ представляет собой довольно сложную задачу, которая в некоторых случаях решается с помощью уравнения Больцмана. В настоящее время сведения о $\Phi R \Delta \Delta$ имеются только для ограниченного числа разрядов в одно- и двухатомных газах. В большинстве случаев она определяется экспериментально. Однако еще больший интерес при разработке оптимальных вакуумно-плазменных

технологий обработки (очистки, селективного "сухого" травления, осаждения) материалов микроэлектроники представляет задача активного формирования спектра электронов для селективного возбуждения определенных энергетических состояний атомов, молекул и ионов [2]. В связи с этим целью настоящей работы было определение вида ФРЭЭ и изучение влияния на нее параметров и режимов работы установки СВЧ вакуумно-плазменного травления и осаждения в магнитном поле материалов, используемых в микроэлектронике, описанной в работе [3].

В экспериментах использовались цилиндрические зонды из вольфрамовой проволоки диаметром 0.4 мм. Для изоляции зондов проволока помещалась в стеклянную трубку, запаиваемую на расстоянии 5 мм от открытого конца зонда. Зонды устанавливались в зоне обработки пластин, расположенной на расстоянии 4 см от выхода плазмотрона; плазмотрон рассчитывался на распространение основной волны типа H_{11} на частоте 2.45 ГГц. Расстояние между зондами составляло 4 см. Ось симметрии зондом совпадала с осью симметрии плазмотрона. ФРЭЭ определяли путем двойного дифференцирования вольт-амперной характеристики двойного зонда по формуле

$$f(\varepsilon) = \frac{m^2}{2\bar{n}e^3n_e} \frac{d^2 j_e}{du^2}.$$

Снятие и обработка зондовой ВАХ проводилась с помощью разработанного автоматического комплекса, представляющего собой оригинальную измерительную систему на базе микро-ЭВМ. Графические данные и результаты расчетов отображались на двухкоординатном графопостроителе Н306.

Для анализа влияния режима работы установки на ФРЭЭ целесообразно представить измеренные распределения аналитической функцией, включающей в себя небольшое количество констант. Подобную функцию можно ввести на основе следующего уравнения:

$$f(\varepsilon) = a\sqrt{\varepsilon} \exp(-b\varepsilon^x). \quad (1)$$

Здесь $f(\varepsilon)$ — нормализованная функция распределения, ε — энергия электрона; a , b , x — константы. Из сравнения (1) с известными функциями распределения Максвелла и Дрюйвестейна следует, что первая из них реализуется при $b = 3/2\bar{\varepsilon}$ и $x = 1$, где $\bar{\varepsilon}$ — средняя энергия электронов. Распределение Дрюйвестейна реализуется при $B = 0.55/\bar{\varepsilon}^2$

и $x = 2$. Экспоненциальный фактор энергии x связан с формой распределения, а экспоненциальная константа b определяет расположение максимума. Константа a используется для нормализации распределения.

Определение констант a, b, x производилось путем минимизации целевой функции $F(a, b, x)$ вида

$$F(a, b, x) = \sum_{i=1}^n \left[\ln f_i(\varepsilon_i) / \sqrt{\varepsilon_i} - \ln a + B\varepsilon_i^x \right]^2, \quad (2)$$

которая имеет смысл суммы квадратов разностей экспериментальных и теоретических значений. Поиск минимума целевой функции осуществлялся на ЭВМ методом координатного спуска [4].

Результаты исследований представлены в таблице. Здесь приведены данные по плотности плазмы (n_e), полученные по двухзондовой методике, плавающему потенциалу V_f , измеренному одиночным зондом, средней энергии электронов, определенной по электронной температуре в предположении Максвелловской функции распределения с помощью двойного зонда ($\langle \varepsilon \rangle_M = 1.5 kT_e$), и измеренному распределению $\langle \varepsilon \rangle = \int_0^{\infty} \varepsilon f(\varepsilon) d\varepsilon$; константы были получены по аналитической подгонке ФРЭЭ (x, a, b). Параметрами управления процессом травления являлись: давление воздуха, СВЧ мощность, скорость прокачки газа, пробочное отношение и отношение ω_n/ω , где ω_n — циклотронная частота, ω — частота внешнего электромагнитного поля, характеризующие пробочную конфигурацию с однородным внешним магнитным полем между пробками.

На рис. 1 приведены типичные ФРЭЭ для $W = 525$ Вт, $\omega_n/\omega = 1$ и различных давлений воздуха, взятые из эксперимента. На рис. 2 представлена экспериментальная ФРЭЭ для $p = 10^{-2}$ Па вместе с соответствующей моделью функции. Можно видеть возможность удовлетворительно представления экспериментальной ФРЭЭ его аналитической моделью вида (1) в области медленных электронов.

Измеренные распределения электронной энергии не носят максвелловский характер. Ни один эксперимент не дал аналитической модели функции с экспоненциальным фактором энергии x , равным 1. Можно видеть, что распределение энергии в максимуме медленных электронов мало изменяется при изменении экспериментальных условий. Это выражается небольшим диапазоном изменения экспоненциального фактора энергии $x = 1.34 \pm 0.04$. Расчетные значения средней энергии электронов из аналитической ФРЭЭ выше

Параметры плазмы и значения констант a , b , x аналитической функции распределения электронов по энергиям $f(\varepsilon) = a\sqrt{\varepsilon}\exp(-b\varepsilon^x)$ для различных режимов работы установки

P , Па	W , Вт	$Q \cdot 10^{-2}$, мл/с	$\frac{\omega_H}{\omega}$	$\frac{V_{\max}}{V_{\min}}$	$n_e \cdot 10^{10}$, см $^{-3}$	V_f , В	ε_M , эВ	$\langle \varepsilon \rangle$, эВ	x	$a \cdot 10^{-3}$	$b \cdot 10^{-3}$
10	525	1.2	1.9		2.2	-4	11.25	9.08	1.36	11.4	14.8
1					6.0	2	7.5	8.00	1.37	11.0	15.1
0.1					18.1	7	12.0	7.77	1.36	9.75	14.8
0.01					30	13	17.5	9.88	1.33	8.31	13.3
0.1	150	1.2	1.9		32		14.25	12.37	1.34	11.0	13.2
	225				30	7.6	12.0	13.11	1.32	10.7	13.6
	300				21	7.6	16.2	12.55	1.33	8.65	11.9
	375				19	7.0	16.5	11.83	1.33	9.28	12.8
	450				20	5.8	18.0	9.76	1.35	8.31	12.4
	525				22	5.8	17.85	11.52	1.35	9.95	12.5
0.1	375	0.5	1.9		20	5.4	17.7	11.83	1.34	9.95	12.8
		1.2			22	5.4	16.8	10.43	1.33	8.65	13.2
		5			18	6.5	15.3	12.10	1.33	9.1	12.5

Продолжение таблицы

Параметры плазмы и значения констант a , b , x аналитической функции распределения электронов по энергиям $f(\varepsilon) = a\sqrt{\varepsilon} \exp(-b\varepsilon^x)$ для различных режимов работы установки

P , Па	W , Вт	$Q \cdot 10^{-2}$, мл/с	$\frac{\omega_H}{\omega}$	$\frac{B_{\max}}{B_{\min}}$	$n_e \cdot 10^{10}$, см $^{-3}$	V_f , В	ε_M , эВ	(ε) , эВ	x	$a \cdot 10^{-3}$	$b \cdot 10^{-3}$
0.1	375	1.2	0.7		15	4	6.0	10.33	1.3	10.8	16.8
			1.0		20	3	7.5	8.74	1.35	15.9	18.8
			1.4		16	13	10.5	11.03	1.38	14.3	14.0
			1.7		18	5.2	11.5	11.34	1.36	12.2	13.6
			1.9		19	6.2	15.0	12.03	1.33	8.92	12.4
			2.2		21	5.0	12.0	11.54	1.35	11.6	13.6
			1.5		25	0.5	19.8	16.63	1.32	5.8	8.2
					22	1	15.75	11.34	1.35	10.8	13.2
					20	0.5	8.8	10.55	1.37	12.8	14.0
					19	1.6	10.8	8.82	1.38	12.8	14.9
0.1	375	1.2		1.9	10	7	10.8	8.91	1.38	13.4	15.2
				2.1	15	2	8.25	10.41	1.36	11.8	14.0
				3.0	10	1.3	6	6.8	1.38	11.6	16.3

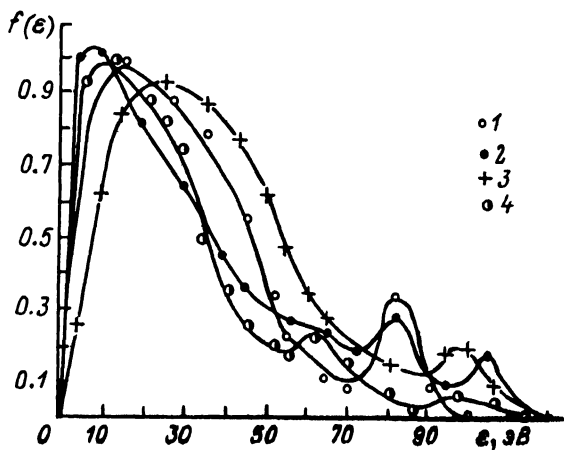


Рис. 1. Влияние давления на функцию распределения электронов по энергиям для воздуха, $W = 525$ Вт, $\omega_n/\omega = 1$

(1 — $P = 10$, 2 — $P = 10^{-1}$, 3 — $P = 10^{-2}$, 4 — $P = 1$ Па).

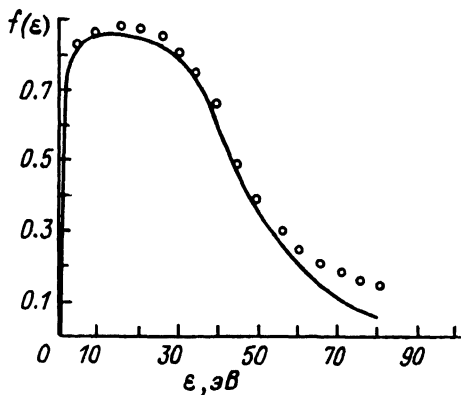


Рис. 2. Сравнение аналитической модели ФРЭЭ

(уравнение(1) — сплошная линия) с измеренным распределением ($W = 525$ Вт, $\omega_n/\omega = 1.9$, $P = 10^{-2}$ Па).

их измеренных значений зондовым методом. Характер же зависимостей этих значений от соответствующих параметров процесса практически одинаков.

Установлено, что единственным значимым параметром установки, влияющим на экспоненциальный фактор, является геометрический размер реактора. С уменьшением его длины, например от 400 до 310 мм, экспоненциальный фактор увеличивался до $x = 1.58 \pm 0.03$ и ФРЭЭ приближалась к дровестейновской.

Интерес представляет сравнение наших результатов с данными работы [5], где измеряли электронное распределение в микроволновой плазме частоты 915 МГц, возбужденной в кислороде. Полученный экспоненциальный фактор составлял величину $x = 1.53 \pm 0.07$ и также мало изменялся при изменении режима генерации плазмы газового разряда.

Проведенные измерения распределения электронной энергии позволяют повысить точность кинетического моделирования плазмохимических процессов.

Список литературы

- [1] *Словецкий Д.И.* Механизмы химических реакций в неравновесной плазме. М., 1980. 310 с.
- [2] *Яфаров Р.К., Назаров А.А., Мевлют Э.Т.* // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. В. 19. С. 73–77.
- [3] *Гуллев Ю.В., Яфаров Р.К.* // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. В. 24. С. 2211–2214.
- [4] *Карманов В.Г.* Математическое программирование. М., 1986. 286 с.
- [5] *Heidenreich J.E., Paraszczak J.R., Moisan M., Sauve G.* // J. Vac. Sci. Technol. 1988. V. 6. N 1. P. 288–292.

Институт радиотехники
и электроники
Саратовский филиал

Поступило в Редакцию
24 января 1994 г.
В окончательной редакции
20 марта 1994 г.