

УДК 537.52

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВОЗДУШНОЙ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ПЛАЗМЫ МИКРОВОЛНОВЫМИ МЕТОДАМИ

И. А. ТИХОМИРОВ, В. В. ТИХОМИРОВ, А. А. СОЛОВЬЕВ, В. И. ШИШКОВСКИЙ,
В. Н. СЕРГЕЕВ

(Представлена научным семинаром физико-технического факультета)

Приведены экспериментальные результаты по определению некоторых параметров плазмы в. ч. разрядов. Обнаружены условия, при которых микроволновые методы дают однозначные результаты измерений.

Получено удовлетворительное согласие микроволновых и зондовых измерений.
Таблиц 2, библиографий 6.

Низкотемпературная плазма газовых разрядов находит в настоящее время широкое применение в различных областях науки и техники. При этом все большее внимание начинает привлекать плазма в. ч. разрядов, что обусловлено высоким к. п. д. этих разрядов, особой чистотой их газоразрядного пространства, простотой управления и регулирования генерируемых при этом плазменных потоков. Данные по физике и диагностике плазмы позволяют с наибольшей эффективностью решать некоторые вопросы плазмохимии и высокотемпературной технологии. Наиболее пригодны для диагностики высокочастотного факельного разряда (ВФР) — микроволновые методы диагностики [1], а именно, метод свободного пространства, при котором непосредственно измеряемыми величинами являются сдвиг фазы и поглощение сигнала.

Для определения 2-х основных параметров — концентрации электронов n_e и эффективной частоты соударений $\nu_{эф}$ — необходимо измерение 2-х величин, характеризующих распространение электромагнитных волн в плазме. Необходимо также знать эффективный диаметр плазменного образования, поскольку в процессе эксперимента получают средние по длине зондирующего луча параметры. Таким образом, для определения n_e и $\nu_{эф}$ необходима система из трех уравнений.

Как известно [2], в общем случае связь показателя поглощения γ_i и показателя преломления N_i с параметрами плазмы дается выражениями:

$$\begin{aligned} \gamma_i &= \sqrt{-\frac{1}{2} \left(1 - \frac{\nu_i}{1+s_i^2}\right)} + \frac{1}{2} \sqrt{\left(1 - \frac{\nu_i}{1+s_i^2}\right)^2 + \left(\frac{\nu_i s_i}{1+s_i^2}\right)^2}; \\ N_i &= \sqrt{\frac{1}{2} \left(1 - \frac{\nu_i}{1+s_i^2}\right)} + \frac{1}{2} \sqrt{\left(1 - \frac{\nu_i}{1+s_i^2}\right)^2 + \left(\frac{\nu_i s_i}{1+s_i^2}\right)^2}, \quad (1) \\ \frac{\nu_{i+1}}{\nu_i} &= \left(\frac{\omega_i}{\omega_{i+1}}\right)^2; \quad \frac{s_{i+1}}{s_i} = \frac{\omega_i}{\omega_{i+1}}; \end{aligned}$$

где

$$v_i = \left(\frac{\omega_0}{\omega_i} \right)^2; \quad s_i = \frac{v_{\text{эф}}}{\omega_i}. \quad (2)$$

Величины γ_i и N_i вычисляются из экспериментально определенных коэффициентов поглощения плазмы ξ_i и величин фазового сдвига зондирующего сигнала φ_i по формулам:

$$\gamma_i = \frac{\lambda_i \xi_i}{4\pi \cdot 4,35d}; \quad (3)$$

$$N_i = 1 - \frac{\varphi_i}{d \frac{\omega_i}{c}}, \quad (4)$$

где d — диаметр плазменного образования,
 λ_i — длина зондирующей СВЧ-волны.

Обработка результатов по формулам (1) представляет определенную трудность, поэтому для определения концентрации электронов n_e и $v_{\text{эф}}$ в в. ч. плазме высокого давления нами рассчитаны на машине „ДНЕПР-21“ номограммы для параметров N_i и γ_i с учетом значений $s > 1$.

Для проведения измерений была разработана установка, объединяющая схему метода 2-х частот и фазометр, которая позволяет проводить определение затуханий на 3-х частотах и фазового сдвига на одной частоте [3]. Зондирование плазмы проводилось на $\lambda_1 = 8$ мм, $\lambda_2 = 12$ мм, $\lambda_3 = 16$ мм, причем на λ_1 проводилось измерение фазового сдвига.

Большим достоинством и оригинальностью установки является широкое применение диэлектрических волноводов. На них выполнены все передающие линии, направленные ответвители и частотный разделитель. Для локализации микроволнового излучения в плазме использовались фокусирующие рупорно-линзовые антенны, состоящие из пирамидальных рупоров и фокусирующих диэлектрических линз.

При зондировании плазменных объектов с размерами в несколько длин волн точность измерения значительно падает из-за дифракции, рефракции и многократного отражения СВЧ сигнала в пространстве между зондирующими антеннами.

С целью определения минимального диаметра плазменного образования, при котором еще возможно однозначное определение концентрации электронов и их эффективной частоты столкновений, нами проведен аналоговый эксперимент по прохождению СВЧ излучения через цилиндрические образцы из фторопласта, полистирола и парафина, имитирующих плазму. Результаты измерений представлены в табл. 1.

Как видно из табл. 1 дифракция начинает сказываться уже при $D_{\text{min}} \approx 10$ мм. При обработке экспериментальных данных с помощью номограммы по измеренным значениям γ_1 , γ_2 , и $\Delta\varphi$ методом подбора определялся одновременно с n_e и $v_{\text{эф}}$ и диаметр разряда. При всех измерениях он оставался значительно больше D_{min} . Сравнение значений эффективных диаметров, полученных микроволновыми методами, с результатами экспериментального исследования радиального распределения электронной концентрации методом 2-х зондов [4] показало удовлетворительное согласие.

СВЧ зондирование в. ч. воздушной плазмы проводилось в металлическом плазмотроне [5] при расстоянии $h = 40$ мм от электрода до оси рупорно-линзовой системы. Питание в. ч. разряда осуществлялось от ге-

нератора ЛД1-4 с рабочей частотой 40 мгц, при подводимой к разряду мощности около 8 квт.

Таблица 1

Затухания ξ_i и сдвиги фаз φ_i для различных диэлектриков

№ п. п.	Материал D [мм]	Полистирол		Парафин		Фторопласт	
		ξ [дб]	φ [0]	ξ [дб]	φ [0]	ξ [дб]	φ [0]
1	60	—	—	15,0	—	—	—
2	55	14,5	—	14,0	—	—	—
3	50	13,5	—	13,0	—	—	—
4	45	12,5	—	12,0	—	—	—
5	40	12,0	—	11,0	—	10,6	—
6	35	11,0	—	10,5	—	10,6	—
7	30	10,0	100	9,5	30	9,2	18
8	25	9,0	75	8,7	24	8,5	16
9	20	8,5	45	8,0	18	7,8	14
10	15	7,5	30	7,5	12	7,0	12
11	10	15,0	70	12,0	48	15,5	0

Результаты микроволновых измерений параметров в.ч. плазмы представлены в табл. 2.

Таблица 2

Значения концентрации электронов n_e и эффективной частоты столкновений электронов с тяжелыми частицами $\nu_{эф}$ при различных давлениях

№ п. п.	P	$n_e \cdot 10^{-11}$	$\nu_{эф} \cdot 10^{-11}$
	торр	см	сек
1	10	$0,90 \pm 0,06$	$0,68 \pm 0,05$
2	20	$0,96 \pm 0,06$	$0,70 \pm 0,05$
3	30	$1,10 \pm 0,06$	$0,71 \pm 0,05$
4	40	$1,23 \pm 0,07$	$0,67 \pm 0,05$
5	50	$1,44 \pm 0,07$	$0,67 \pm 0,05$
6	60	$1,66 \pm 0,07$	$0,67 \pm 0,05$
7	80	$2,30 \pm 0,07$	$0,69 \pm 0,05$
8	100	$2,84 \pm 0,07$	$0,78 \pm 0,05$
9	120	$3,41 \pm 0,07$	$0,90 \pm 0,05$
10	140	$4,55 \pm 0,07$	$0,90 \pm 0,05$
11	160	$6,52 \pm 0,08$	$0,95 \pm 0,05$
12	180	$6,80 \pm 0,08$	$1,02 \pm 0,05$
13	200	$6,91 \pm 0,08$	$1,15 \pm 0,06$

Из табл. 2 можно заметить, что n_e и $\nu_{эф}$ увеличиваются с увеличением давления в разрядной камере. Сопоставление полученной зависимости $n_e = f(P)$ с результатами измерений напряжения горения и полного тока разряда [5] и данными о температуре газа [6] при различных давлениях позволяют сделать вывод, что диапазону давлений, при ко-

торых происходит формирование канала ВФР, соответствует резкое увеличение электронной концентрации.

Проведенные исследования показали, что микроволновые методы пригодны для диагностики высокочастотного факельного разряда пониженного давления. Однако использование излучения с $\lambda = 8$ мм возможно при диаметре плазменного образования $D \geq 10$ мм. При $D < 10$ мм и при достаточных n_e необходимо переходить на более коротковолновое излучение СВЧ диапазона или же диагностировать в.ч. плазму с помощью лазеров.

ЛИТЕРАТУРА

1. И. А. Тихомиров, В. В. Тихомиров, В. В. Марусин. В сб.: «Вопросы физики низкотемпературной плазмы». Минск, «Наука и техника», 1971.
 2. А. В. Чернетский, О. А. Зиновьев, О. В. Козлов. Аппаратура и методы плазменных исследований. Под ред. В. Д. Русанова. М., Атомиздат, 1968.
 3. И. А. Тихомиров, В. В. Тихомиров, В. Я. Федянин, В. И. Шишковский, А. А. Соловьев. Первый Всесоюзный симпозиум по плазмохимии. М., 1971.
 4. И. А. Тихомиров, В. В. Тихомиров, В. И. Шишковский, А. А. Соловьев, В. Н. Сергеев. Настоящий сборник.
 5. И. А. Тихомиров, В. В. Тихомиров, Н. А. Мошнёнко, В. Я. Федянин. В сб.: «Физика, техника и применение низкотемпературной плазмы». Алма-Ата. 1970, стр. 702.
 6. М. З. Хохлов. «Оптика и спектроскопия», 4, 439 (1958).
-