

УДК 537.52

ФАКЕЛЬНЫЙ РАЗРЯД КАК ЛИНИЯ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

И. А. ТИХОМИРОВ, В. В. ТИХОМИРОВ, В. С. ЛЕВАШОВ

(Представлена научным семинаром физико-технического факультета)

В работе рассмотрена эквивалентная схема факельного разряда. Из анализа уравнений для линии с распределенными параметрами предложена методика, которая позволяет по экспериментально измеренным входному сопротивлению, частоте и длине разряда, а также по коэффициенту затухания тока в разряде определить емкость, индуктивность и активное сопротивление разряда. Показано удовлетворительное согласие результатов электрических и микроволновых измерений.

Таблица 1, библиографий 12.

В настоящее время для питания в. ч. плазмотронов факельного типа используются промышленные в. ч. автогенераторы с частотами колебаний $10 \div 40$ мГц [1—2]. При этом непосредственное подключение плазмотрона к в. ч. генератору приводит к перестройке его колебательного контура, вследствие того, что электрические параметры факельного разряда складываются с параметрами контура генератора. Поэтому для эффективного использования системы генератор-плазмотрон необходимо знать эквивалентные электрические параметры разряда.

Экранированный высокочастотный факельный разряд (ВФР) в молекулярных газах представляет собой плазменное образование с ярко выделенным каналом, температура которого значительно выше оболочки [3] и длина которого много больше его поперечных размеров. Развивая положение работы [4], где утверждается, что канал ВФР можно рассматривать как тонкий провод, направляющий электромагнитную волну и поглощающий мощность из этой волны, и что пространственное распределение полей в ВФР хорошо описывается функциями Бесселя в канале и Ганкеля вне его, представим эквивалентную нагрузку в. ч. генератора в виде экранированного ВФР как линию с распределенными параметрами, т. е. активное сопротивление, емкость и индуктивность не сосредоточены в одной точке, а распределены по длине канала ВФР. В таком случае при больших мощностях, вкладываемых в разряд, необходимо учитывать в отличие от Неймана [5], не только активное сопротивление и емкость ВФР, но также и индуктивность разряда, поскольку геометрия разряда в металлическом плазмотроне сравнима с геометрией анодной индуктивности в. ч. генератора.

Если воспользоваться уравнениями [6] для коаксиальной линии, описывающими изменение тока и напряжения в пространстве и времени, то применительно к рассматриваемым условиям получим следующие соотношения:

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} &= L_0 C_0 \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} + (C_0 R_0 + G_0 L_0) \frac{\partial U}{\partial t} + G_0 R_0 U, \\ \frac{\partial^2 i}{\partial x^2} &= L_0 C_0 \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} + (C_0 R_0 + G_0 L_0) \frac{\partial i}{\partial t} + G_0 R_0 i,\end{aligned}\quad (1)$$

решением которых, в случае синусоидальных зависимостей от времени, будут являться комплексы

$$U = U_0 e^{j\omega t - \gamma x} \text{ и } i = I_0 e^{j\omega t - \gamma x}. \quad (2)$$

Здесь R_0 — активное сопротивление канала ВФР, L_0 — индуктивность и C_0 — емкость „канал разряда — плазмотрон“, G_0 — активная проводимость между каналом разряда и корпусом плазмотрона. Величины R_0 , L_0 , C_0 и G_0 взяты на единицу длины коаксиальной линии, образованной корпусом плазмотрона и каналом ВФР. Всю линию можно рассматривать как совокупность последовательно соединенных малых элементов dx .

Постоянную распространения электромагнитной волны — γ можно записать в виде

$$\gamma = \pm (\alpha + i\beta) = \pm \sqrt{(R_0 + j\omega L_0) \cdot (G_0 + j\omega C_0)}, \quad (3)$$

где ω — частота поля, α — коэффициент затухания, β — фазовая постоянная или коэффициент фазы.

Если факельный разряд возбуждается в металлическом плазмотроне, внутри которого помещена кварцевая трубка, то с достаточной точностью можно утверждать, что

$$G_0 = 0. \quad (4)$$

Кроме того, из сопоставления результатов зондовых и микроволновых измерений, проведенных нами [7, 8], и результатов работ [9, 10] можно сделать вывод, что

$$R_0^2 \gg (\omega L_0)^2. \quad (5)$$

Воспользовавшись выражениями (4) и (5), после некоторых преобразований можно получить следующие выражения для коэффициента затухания:

$$\alpha = \pm \sqrt{\frac{1}{2} (\omega C_0 R_0 - \omega^2 L_0 C_0)} \quad (6)$$

и волнового сопротивления факела

$$Z_b = \sqrt{L_0 / C_0}. \quad (7)$$

Отрезок коаксиальной линии, длиной l , должен обладать собственной частотой, которая при выполнении условий (4) и (5) будет иметь вид

$$\omega_n = \frac{\pi n}{l} \sqrt{\frac{1}{L_0 C_0} - \frac{l^2 R_0^2}{2\pi n^2 L_0^2}}. \quad (8)$$

Из выражения (8) можно заметить, что для экранированного ВФР $l \sim \omega^{-1}$, в отличие от неэкранированного, где $l \sim \omega^{-\frac{1}{2}}$ т. е. при постоянной мощности, рассматриваемой в плазме ВФР, длина его канала устанавливается такой, что собственная частота ВФР в плазмотроне равна частоте генерации, т. е. выполняется условие (8), где $\omega_n = \omega_{\text{ген}}$.

Из сопоставления уравнений (6), (7) и (8) можно сделать вывод, что при наличии достаточного количества экспериментальных данных, решая эти уравнения относительно L_0 , R_0 и C_0 , можно получить инфор-

мацию о величине активного сопротивления, индуктивности и емкости ВФР.

Таким образом, предлагаемый нами новый метод определения R , C и L заключается в следующем.

Измеряется частота в. ч. поля, длина канала ВФР, а также его входное сопротивление, которое согласно [4] равно его волновому сопротивлению (отношению разности потенциалов между каналом разряда и экранирующим цилиндром к току в разряде). Коэффициент затухания α определяется из выражения (2) при известном распределении тока по длине разряда, которое находится по методике, описанной в нашей работе [11]. Искомые параметры, определяются из решения системы уравнений (6), (7), (8).

Для проверки предложенной методики одновременно с электрическими измерениями было проведено микроволновое зондирование разряда, т. е. определены средние по диаметру разряда значения электронной концентрации — n_e и эффективной частоты соударений — $\nu_{эф}$. Зная n_e и $\nu_{эф}$ при $\omega_{ген}^2 \ll \nu_{эф}^2$ можно определить удельную электропроводность

$$\sigma = \frac{e^2 \cdot n_e}{m \cdot \nu_{эф}}, \quad (9)$$

а затем при известной геометрии разряда вычислить удельное активное сопротивление разряда.

Разработанная нами установка для проведения СВЧ измерений, а также методика обработки экспериментальных данных описаны в работе [12].

Измерения проведены при атмосферном давлении в воздушной плазме.

Результаты проведенных измерений и расчетов представлены в табл. 1.

Таблица 1
Емкость, индуктивность и активное сопротивление факельного разряда

№	I_a	f	l	U_p	I_p	Z_b	α	C_0
п.п.	a	мггц	М	v	a	ом	М ⁻¹	пф/М
1	0,8	42,95	0,05	560	2,10	267	20,4	27,3
2	1,0	42,92	0,10	630	2,14	294	11,0	25,0
3	1,2	42,90	0,13	750	2,16	347	6,4	20,2
4	1,4	42,85	0,16	875	2,20	398	4,9	17,3
5	1,6	42,82	0,22	1000	2,24	447	4,0	14,2

№	L_0	R_0	n_e	$\nu_{эф}$	$R_{0\text{ СВЧ}}$	R	C	L
п.п.	мкгн/м	ом/м	см ⁻³	сек ⁻¹	ом/м	ом	пф	мкгн
1	1,92	$11,5 \cdot 10^4$	—	—	—	5760	1,36	0,09
2	2,34	$3,08 \cdot 10^4$	$1,15 \cdot 10^{11}$	$2,12 \cdot 10^{11}$	$5,4 \cdot 10^4$	3080	2,50	0,23
3	2,15	$1,62 \cdot 10^4$	$1,30 \cdot 10^{11}$	$2,20 \cdot 10^{11}$	$2,1 \cdot 10^4$	2110	2,64	0,33
4	2,74	$1,09 \cdot 10^4$	$1,75 \cdot 10^{11}$	$2,54 \cdot 10^{11}$	$1,7 \cdot 10^4$	1750	2,78	0,44
5	2,83	$2,15 \cdot 10^4$	$2,20 \cdot 10^{11}$	$2,80 \cdot 10^{11}$	$1,0 \cdot 10^4$	2000	3,12	0,62

Из сопоставления значений R_0 , вычисленных из результатов электрических измерений и $R_{0\text{ СВЧ}}$ из микроволновых, можно сделать вывод, что расхождение не превышает 20%, т. е. предложенная нами методика пригодна для определения электрических параметров ВФР. Завышенные значения $R_{0\text{ СВЧ}}$ объясняются тем, что при микроволновых измерениях определяются параметры, усредненные по пути зондирования, а не относящиеся непосредственно к каналу разряда.

Как видно из таблицы, не только эквивалентная емкость факельного разряда, но и его индуктивность сравнимы с параметрами колебательного контура в. ч. генератора, поэтому их необходимо учитывать при расчете и конструировании факельных плазмотронов для промышленных в. ч. генераторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. Н. Колпаков, В. Л. Теплоухов, И. А. Тихомиров, К. Н. Югай. В сб.: «Генераторы низкотемпературной плазмы». М., «Энергия», 1969, стр. 341.
2. И. А. Тихомиров, В. М. Савельев, В. Л. Теплоухов, Г. Н. Колпаков, В. В. Тихомиров, К. Н. Югай, А. П. Кутлин, В. В. Цой, В. П. Дрямов. В сб.: «Физика, техника и применение низкотемпературной плазмы». Алма-Ата, 1970, стр. 702.
3. А. Григоровичи, Д. Кристеску. «Оптика и спектроскопия», 6, 129, (1959).
4. А. В. Качанов, Е. С. Трехов, Е. П. Фетисов. В сб.: «Физика газоразрядной плазмы». Вып. 1, М., Атомиздат, 1968, стр. 39, 48.
5. М. С. Нейман. «Известия электропромышленности слабого тока», № 7, 1, (1935).
6. К. Шимони. Теоретическая электротехника. Пер. с нем. под ред. К. М. Поливанова. М., «Мир», 1964.
7. И. А. Тихомиров, В. В. Тихомиров, В. Я. Федянин. «Известия ТПИ», т. 225, Томск, изд-во ТГУ, 1972, стр. 89.
8. И. А. Тихомиров, В. В. Тихомиров, В. В. Марусин. В сб.: «Вопросы физики низкотемпературной плазмы». Минск, «Наука и техника», 1970, стр. 189.
9. А. А. Кузовников, Н. А. Капцов. Известия вузов, «Физика», № 6, 64, (1960).
10. A. Talsky. «Чехосл. физ. журнал» SB. 14, 594, (1964).
11. И. А. Тихомиров, В. В. Тихомиров, Н. А. Мошненко, В. Я. Федянин. В сб.: «Физика, техника и применение низкотемпературной плазмы». Алма-Ата, 1970, стр. 709.
12. И. А. Тихомиров, В. В. Тихомиров, А. А. Соловьев, В. И. Шишковский. Известия ТПИ, т. 276. Изд-во ТГУ, 1975, с. 26.