

УДК 537.52

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОЛНОВОГО ЧИСЛА
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ,
РАСПРОСТРАНЯЮЩЕЙСЯ В ПЛАЗМЕ
ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ФАКЕЛЬНОГО РАЗРЯДА**

В.А. ВЛАСОВ., И.А. ТИХОМИРОВ., Ю.Ю. ЛУЦЕНКО

Томский политехнический университет

Проведены измерения амплитудно-фазовых характеристик электромагнитного поля высокочастотного факельного разряда, горящего в воздухе и аргоне. На основе экспериментально полученных радиальных распределений радиальной компоненты электрического поля проведено определение величины волнового числа электромагнитной волны, распространяющейся в воздушной плазме высокочастотного факельного разряда. Рассчитано осевое распределение радиальной компоненты электрического поля на основе модели канала факельного разряда в виде электрической линии конечной длины.

Высокочастотный факельный разряд (ВЧФР) представляет собой плазменный факел, горение которого происходит за счет диссипации энергии электромагнитного поля. Поэтому для описания физических процессов, протекающих в ВЧФР, большое значение имеет правильное представление о характеристиках электромагнитной волны, распространяющейся в плазме разряда. Наиболее важным параметром, характеризующим процесс распространения электромагнитной волны является её волновое число $h = \alpha + j\beta$, действительная часть которого α (коэффициент фазы) определяет длину электромагнитной волны в плазме разряда, мнимая часть β (коэффициент затухания) характеризует процесс затухания поля в плазме разряда.

В работе [1] волновое число электромагнитной волны, распространяющейся в ВЧФР, определялось посредством измерения осевого распределения высокочастотного тока, протекающего в канале разряда. Авторы работы предполагали, что вдоль факельного разряда распространяется плоская неоднородная волна вида

$$U = U_0 e^{jhz}.$$

Здесь U и U_0 — амплитуда электромагнитной волны в точках z и $z = 0$ соответственно, h — волновое число, z — осевая координата. В этом случае амплитуда электромагнитной волны будет меняться вдоль канала разряда по экспоненциальному закону, а её фазовый сдвиг — по линейному.

Однако проведенные нами измерения электромагнитного поля факельного разряда, горящего в воздухе при атмосферном давлении [3], показали отсутствие затухания амплитуды поля вдоль канала разряда. Изменение же фазового сдвига компонент поля вдоль оси разряда несколько отличается от линейного закона.

Заметим, что ранее проводимые измерения высокочастотного тока вдоль оси ВЧФР осуществлялись посредством поясов Роговского, собранных в единый блок вдоль оси разряда. В этом случае, на наш взгляд, емкость и индуктивность измери-

тельной системы значительно превышала емкость и индуктивность плазмоида разряда. Поэтому измерения высокочастотного тока фактически сводились к измерению токов утечки.

На рис. 1. представлены осевые распределения радиальной компоненты электрического поля ВЧФР, горящего в воздухе и аргоне при атмосферном давлении. Координата, откладываемая по оси абсцисс, для наглядности приведена нами в единицах длины канала ВЧФР. Осевое распределение других компонент электромагнитного поля имеет аналогичный характер. Как видно на рисунке, амплитуда компонент электромагнитного поля не меняется вдоль зоны каналирования ВЧФР, горящего на воздухе. В случае же ВЧФР, горящего в аргоне, наблюдается рост компонент поля вдоль оси разряда. Фазовый сдвиг радиальной компоненты электрического поля вдоль оси разряда меняется по закону, отличающемуся от линейного.

Эти результаты говорят о том, что электромагнитное поле ВЧФР имеет сложный характер и не может быть описано лишь одной [1, 2] электромагнитной волной вида $U = U_0 e^{jhz}$. При этом волновое число не может быть определено непосредственно из осевых распределений амплитуды и фазового сдвига той или иной компоненты поля, как это было сделано в работе [2].

Поэтому в настоящей работе определение волнового числа электромагнитной волны, распространяющейся в ВЧФР, проводилось нами по радиальным распределениям радиальной компоненты электрического поля. Заметим, что форма канала факельного разряда близка к цилиндрической, а электромагнитное поле разряда определяется [3] электромагнитным полем поперечно-магнитной волны симметричного типа. В этом случае, радиальное распределение радиальной компоненты электрического поля E_r в непроводящей зоне будет описываться [4] функцией Ханкеля 1-го рода 1-го порядка

$$E_r = AH_1^{(1)}(r\sqrt{k^2 - h^2}). \quad (1)$$

Здесь A — константа, r — радиальная координата, k — коэффициент распространения электромагнитной волны в воздухе. Таким образом, сопоставляя результаты расчетов величины E_r , проведенных по формуле (1), с результатами экспериментальных измерений, можно получить информацию о волновом числе и соответственно определить величины коэффициентов фазы и затухания электромагнитной волны, распространяющейся в разряде.

Результаты измерений радиального распределения радиальной компоненты электрического поля для случая ВЧФР, горящего в воздухе и имеющего мощность 1,5 кВт, представлены на рис. 2. Измерения амплитуды и фазового сдвига компонент электромагнитного поля проводились нами посредством емкостных и индуктивных зондов, перемещаемых в осевом и радиальном направлениях относительно плазмоида разряда. Емкостной зонд представлял собой медный штырь диаметром 1 мм и длиной 3 ... 5 мм.

В качестве индуктивного зонда использовалась круглая трехвитковая рамка, намотанная на тефлоновый

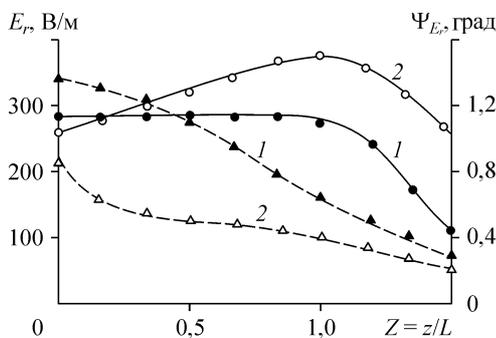
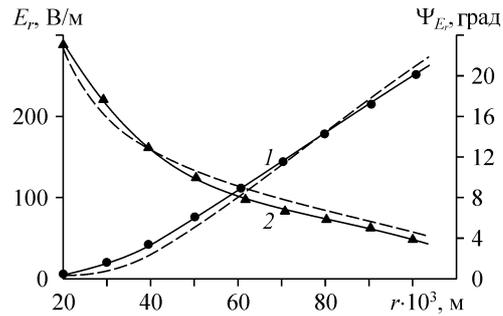


Рис. 1. Осевое распределение амплитуды и фазового сдвига радиальной компоненты электрического поля высокочастотного факельного разряда.

1 — воздух, 2 — аргон, сплошные линии — амплитуда, пунктир — фазовый сдвиг.

Рис. 2. Радиальное распределение амплитуды и фазового сдвига радиальной компоненты электрического поля высокочастотного факельного разряда.

1 — фазовый сдвиг, 2 — амплитуда, сплошные линии — эксперимент, пунктир — расчет.



каркас диаметром 10 мм. Сигнал с зондов подавался на вход осциллографа или фазометра в зависимости от вида измеряемой величины.

Мощность разряда варьировалась от 0,5 до 2,0 кВт. Частота электромагнитного поля составляла 40 МГц.

Рисунок 2 иллюстрирует экспериментально полученные кривые, которые незначительно отличаются от кривых, полученных на основе расчетов по формуле (1). Поэтому можно говорить о корректности определения величины волнового числа путем использования формулы (1).

Поскольку волновое число, фигурирующее в выражении (1), является комплексной величиной и определяется двумя параметрами α и β , то и для его однозначного нахождения требуется проводить сопоставление расчетных и экспериментальных результатов по двум параметрам. В настоящей работе этими параметрами являлись отношение амплитуд $E_{r|r=30}/E_{r|r=90}$ и разность фаз $\Psi_{Er|r=30} - \Psi_{Er|r=90}$ радиальной компоненты электрического поля на расстоянии 30 и 90 мм от оси разряда. Таким образом, сопоставление экспериментальной и расчетной кривых проводилось по отношению величин радиальной компоненты электрического поля, определенных при двух значениях радиальной координаты. Выбор этих значений произволен и определялся преимущественно величиной погрешности экспериментальных результатов.

Результаты расчетов величин отношения амплитуд $E_{r|r=30}/E_{r|r=90}$ и разности фаз $\Psi_{Er|r=30} - \Psi_{Er|r=90}$ радиальной компоненты электрического поля с использованием формулы (1) при различных значениях α и β представлены на рис. 3 и 4.

Как видно из этих рисунков, отношение амплитуд зависит преимущественно от величины коэффициента фазы, в то время как коэффициент затухания определяется в основном разностью фаз.

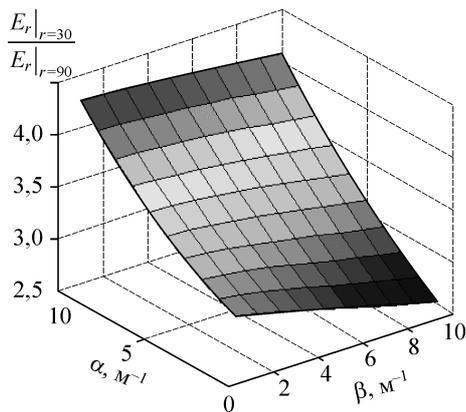


Рис. 3. Зависимость отношения амплитуд электрического поля от коэффициентов фазы и затухания электромагнитной волны.

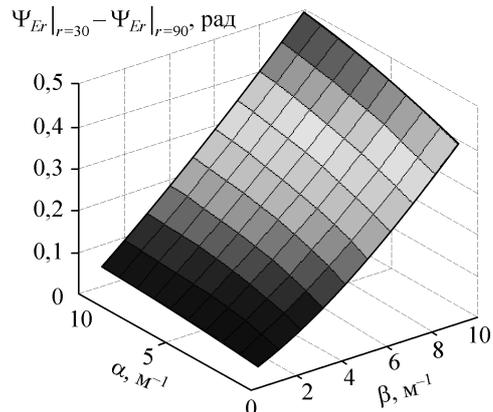


Рис. 4. Зависимость разности фаз электрического поля от коэффициентов фазы и затухания электромагнитной волны.

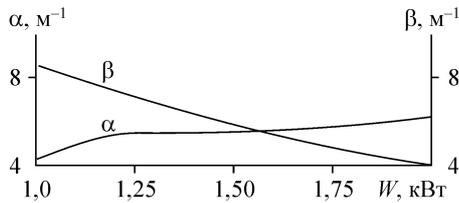


Рис. 5. Зависимость коэффициентов фазы и затухания электромагнитной волны от мощности высокочастотного факельного разряда.

Путем сопоставления расчетных и экспериментальных данных получены значения величин коэффициентов фазы и затухания в зависимости от мощности разряда. Результаты представлены на рис. 5 для ВЧФР, горящего на воздухе при атмосферном давлении, из которого следует, что с увеличением мощности разряда затухание электромагнитной волны уменьшается. В то же время коэффициент фазы увеличивается, и, соответственно, длина электромагнитной волны, распространяющейся в плазме разряда, уменьшается. Полученные результаты также показывают, что для ВЧФР, имеющего мощность от 1,0 до 2,0 кВт, длина электромагнитной волны в 4 ... 7 раз превышает длину канала разряда. При этом затухание компонент электромагнитного поля в e раз происходит на расстоянии, сопоставимом с длиной канала разряда.

Рассмотрим осевые распределения компонент электромагнитного поля для случая воздушной плазмы ВЧФР. На рис. 1. видно, что амплитуда компонент поля не меняется вдоль зоны каналирования разряда. Падение интенсивности поля наблюдается лишь в зоне диффузного горения разряда. Для объяснения этих результатов ранее в [5] было выдвинуто предположение о наличии в канале факельного разряда отраженной электромагнитной волны.

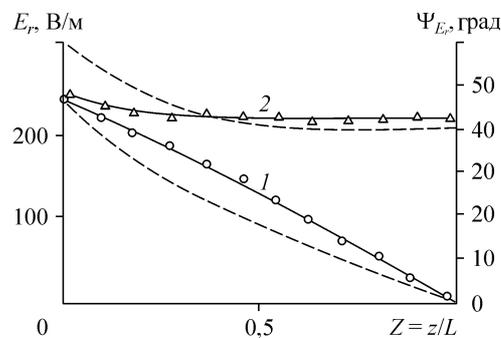
Проведем расчет осевого распределения радиальной компоненты электрического поля ВЧФР с учетом отражения электромагнитной волны в конце канала разряда. Отражение электромагнитной волны будем предполагать полным и синфазным. В этом случае распределение компонент поля вдоль оси разряда описывается следующим выражением:

$$U = U_0 ch[jh(L - z)]. \quad (2)$$

Здесь U и U_0 — комплексные величины какой-либо компоненты поля соответственно в точках z и $z = 0$, j — мнимая единица, L — длина канала разряда, h — волновое число, z — осевая координата.

Результаты расчета приведены на рис. 6 для случая ВЧФР, горящего в воздухе и имеющего мощность 1,5 кВт. Расчет проводился с учетом полученных величин коэффициентов фазы и затухания. Расчетные кривые амплитуды и фазового сдвига качественно совпадают с экспериментальными кривыми (см. рис. 6). Количественное отличие не превышает 30 % преимущественно на начальном участке канала разряда, на котором происходит формирование электромагнитной волны.

Рис. 6. Теоретические и экспериментальные осевые распределения радиальной компоненты электрического поля высокочастотного факельного разряда. 1 — фазовый сдвиг, 2 — амплитуда, сплошные линии — эксперимент, пунктир — расчет.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Качанов А.В., Трехов Е.С., Фетисов Е.П. Электродинамическая модель высокочастотного факельного разряда // Журнал технической физики. — 1970. — № 11. — С. 340–345.
2. Качанов А.В. Лабораторный высокочастотный факельный плазмотрон и электродинамические параметры в нем / Тез. VIII Всесоюзной конференции по генераторам низкотемпературной плазмы. — Новосибирск, 1980. — С. 107–110.
3. Тихомиров И.А., Луценко Ю.Ю. Соотношение между джоулевыми потерями для волн типа TE и TM в канале высокочастотного факельного разряда // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. — 1989. — Вып. 1. — С. 81–84.
4. Стреттон Д. Теория электромагнетизма. — М.-Л.: Гостехиздат, 1948. — 548 с.
5. Тихомиров И.А., Луценко Ю.Ю. Взаимосвязь геометрии высокочастотного факельного разряда с характеристиками его электромагнитного поля // Журнал технической физики. — 1989. — № 11. — С. 128–130.

Статья поступила в редакцию 25 ноября 2005 г.