РАЗДЕЛ IV. ФИЗИКА

Луценко Ю.Ю., Мюсова А.Е.

Особенности электродинамики высокочастотного факельного разряда, горящего в аргоне

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет
(Россия, Томск)*

doi: 10.18411/tj-08-2021-14

Аннотация

Приведены результаты измерений осевого распределения радиальной компоненты электрического поля высокочастотного факельного разряда, горящего в аргоне при атмосферном давлении. Проведён расчёт осевого распределения электрического поля факельного разряда на основе модели канала разряда в виде однородной электрической линии. Показано, что в аргонной плазме разряда происходит частичное отражение электромагнитной волны.

Ключевые слова: разряд, плазма, электромагнитная волна.

Abstract

The results of measurements of the axial distribution of the radial component of the electric field of a high-frequency torch discharge burning in argon at atmospheric pressure are presented. The calculation of the axial distribution of the electric field of the torch discharge is carried out on the basis of the model of the discharge channel in the form of a uniform electric line. It is shown that in the argon plasma of the discharge there is a partial reflection of the electromagnetic wave.

Keywords: discharge, plasma, electromagnetic wave.

Высокочастотный факельный разряд представляет собой плазменный шнур, горящий с поверхности электрода, к которому приложено высокочастотное напряжение. При проведении плазмохимических процессов факельный разряд имеет ряд преимуществ по сравнению с другими высокочастотными разрядами. Он имеет большой объём разрядной плазмы при малой величине подводимой мощности, легко возбуждается в различных средах, устойчив к запылению. При проведении некоторых плазмохимических процессов требуется исключить окисление перерабатываемого материала. В этом случае в качестве плазмообразующего газа используются инертные газы, как правило – аргон. Заметим, что особенности горения факельного разряда в аргоне в настоящее время недостаточно исследованы.

В настоящей работе проведены измерения осевого распределения напряжённости электрического поля факельного разряда, горящего в аргоне. Проведён расчёт вышеуказанного распределения на основе модели канала разряда в виде однородной электрической линии.

Схема экспериментальной установки, используемой при измерениях, представлена на рисунке 1.

Рис.1. Схема экспериментальной установки. 1 – ВЧ факельный разряд; 2 – емкостные и индуктивные зонды; 3 – измерительный прибор; 4 – генератор «опорного» сигнала

Исследуемый разряд возбуждался в кварцевой камере диаметром 28 мм и длиной 500 мм. Питание разряда высокочастотным напряжением осуществлялось от ВЧ-генератора типа ЛСП-ГМ с частотой генерации $\nu=40,68$ МГц и колебательной мощностью $W=4$ кВт. Разряд возбуждался в аргоне при атмосферном давлении. Длина и диаметр канала разряда составляли 33 см и 2 мм соответственно.

Измерение осевого распределения радиальной компоненты электрического поля проводилось емкостными зондами, перемещаемыми вдоль оси разряда. Расстояние от оси разряда составляло 50 мм. Емкостной зонд представлял собой медный штырь диаметром 1 мм и длиной 5 мм. Сигнал от зондов по линии с двойной экранировкой подавался на вход осциллографа. Осциллограф и генератор «опорного» сигнала находились в экранированном помещении.

Результаты измерений представлены на рисунке 2. По оси абсцисс осевая координата приведена в единицах длина канала разряда L .

Рис.2. Осевое распределение радиальной компоненты электрического поля факельного разряда, горящего в аргоне

Как видно из представленного рисунка амплитуда напряжённости электрического поля линейно затухает вдоль оси разряда. При этом амплитуда напряжённости электрического поля уменьшается вдоль канала разряда на 35...40%.

Заметим, что согласно существующей модели факельного разряда [1], его горение осуществляется за счёт диссипации энергии электромагнитной волны. При этом длина канала разряда оценивается как величина обратная величине коэффициента затухания электромагнитной волны, поддерживающей горение разряда. В этом случае амплитуда электромагнитной волны должна уменьшаться вдоль канала разряда в 2,72 раза. Столь сильное затухание электромагнитного поля не наблюдается экспериментально. Поэтому можно предположить, что в плазме факельного разряда наряду с «прямой» электромагнитной волной присутствует также и «отражённая» электромагнитная волна. Рассмотрим канал факельного разряда в виде однородной электрической линии. В этом случае радиальную компоненту электрического поля факельного разряда можно представить следующим выражением:

$$E_r = A \left[c e^{jh(L-z)} + e^{-jh(L-z)} \right] \quad (1)$$

Здесь: A – коэффициент; h – комплексное волновое число, распространяющейся электромагнитной волны; j – мнимая единица; L – длина канала разряда, z – осевая координата; s – комплексный коэффициент отражения электромагнитной волны в конце канала разряда.

Определим величину волнового числа электромагнитной волны, распространяющейся в аргоновой плазме факельного разряда. Согласно работе [1], приближённое значение волнового числа можно определить по следующей формуле:

$$h = \frac{1+j}{a\sqrt{5}} \sqrt{\frac{\omega\epsilon_0}{\sigma}} \quad (2)$$

Здесь: j – мнимая единица; a – радиус канала; ϵ_0 – абсолютная диэлектрическая проницаемость; ω – частота электромагнитного поля; σ – удельная электропроводность плазмы разряда.

Соответственно для определения волнового числа необходимо определить величину удельной электропроводности плазмы разряда. Величина удельной электропроводности может быть рассчитана на основе известных значений электронной и газовой температуры.

Измерения электронной и газовой температуры аргоновой плазмы факельного разряда проводились спектральным методом.

Электронная температура измерялась по относительной интенсивности линий меди. Использовались линии 5106 Å, 5153 Å и 5218 Å. Энергии и относительные вероятности переходов, соответствующих данным линиям были взяты из работы [2]. Излучение от исследуемого объёма разряда посредством линзы проецировалось на щель спектрографа Shamrock – 303i. Спектр выводился непосредственно на экран компьютера.

Для оценки газовой температуры аргоновой плазмы в плазмобразующий газ добавлялся воздух в концентрации не более 5%. При этом в спектре разряда появлялась полоса гидроксидов 3064 Å. Измерение газовой температуры проводилось по относительной интенсивности вращательных переходов данной молекулярной полосы. Использовались линии колебательной ветви Q_1 . Выбирались линии свободные от наложения других линий – Q_{14} , Q_{16} , Q_{19} , Q_{110} .

В результате измерений было установлены следующие значения электронной и газовой температуры: $T_e = 7800$ К и $T = 1800$ К. Согласно результатам работы [3] этим значениям температуры будет соответствовать удельная электропроводность $\sigma = 46 \text{ ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$. Используя полученное значение величины удельной электропроводности плазмы разряда можно оценить величину волнового числа электромагнитной волны. В соответствии с формулой (2) получим следующее значение для волнового числа: $h = 3(1+j) \text{ м}^{-1}$.

Проведём расчёт осевого распределения радиальной компоненты электрического поля факельного разряда, горящего в аргоне, по формуле (1). При расчёте будем использовать величину коэффициента A , исходя из полученных в эксперименте начальных условий. Предполагая, что отражение электромагнитной волны в конце канала разряда имеет синфазный характер, будем рассматривать коэффициент отражения s в виде вещественной величины. Геометрические размеры разряда примем такие же, как и у разряда, используемого при экспериментальных измерениях: длина канала $L = 33$ см, диаметр канала $d = 2$ мм.

В результате проведённых расчётов было установлено, что степень затухания электромагнитного поля вдоль канала разряда совпадает с экспериментально наблюдаемой величиной в случае, когда коэффициент отражения s близок к величине 0,5.

Результаты расчётов при $s = 0,5$ представлены на рисунке 3.

Рис.3. Рассчитанное осевое распределение радиальной компоненты электрического поля.

Отклонение рассчитанного распределения от линейной зависимости, по-видимому, обусловлено осевой неоднородностью канала факельного разряда.

Таким образом, в результате проведённых измерений и расчётов установлено, что горение факельного разряда в аргоне поддерживается электромагнитной волной, которая на 50% отражается в конце канала разряда.

1. Качанов А.В., Трехов Е.С., Фетисов Е.П. Электродинамическое описание высокочастотного факельного разряда // Физика газоразрядной плазмы. – М., 1968. – Вып.1. – с. 39-47.
2. Hess H., Kloss H.-G., Rademacher K., Seliger K. Vergleich zwischen einem Verfahren zur Bestimmung von Bogentemperaturen mit Hilfe von Stoßwellen und einer spektroskopischen Methode // Beiträge aus der Plasmaphysik. – 1962. – Bd. 2. – № 3. – S. 171 – 178.
3. Kannapan D., Bose T.K. Transport properties of a two-temperature argon plasma. // The Physics of Fluids. – 1977. – vol. 20. – №10. – p.1668 – 1673.