

Амплитудно-частотные характеристики электромагнитного поля высокочастотного факельного разряда

© Ю.Ю. Луценко, В.А. Власов, Е.П. Зеленецкая

Томский политехнический университет,
634050 Томск, Россия
e-mail: luts@mail.ru

(Поступило в Редакцию 29 июля 2009 г.)

Приведены результаты измерений осевого распределения гармонических составляющих электрического поля факельного разряда, горящего в среде аргона при различных частотах основной гармоники. Установлен резонансный характер затухания четвертой гармоники электромагнитного поля.

В работе [1] было установлено отсутствие затухания первых двух гармоник электромагнитной волны, распространяющейся вдоль высокочастотного факельного разряда, горящего в воздухе. При горении разряда в аргоне наблюдалось отсутствие затухания первых трех гармоник. В то же время при увеличении частоты электромагнитной волны, распространяющейся вдоль проводящего цилиндра, ее затухание должно возрастать. Для объяснения полученных результатов было высказано предположение о наличии в плазме факельного разряда параметрического взаимодействия внешнего электромагнитного поля с собственными колебаниями плазмы. Так как подобный эффект наиболее выражен в случае горения разряда в среде аргона, то представляет собой интерес более детально проанализировать распространение электромагнитной волны в аргоновой плазме разряда.

В настоящей работе рассмотрено влияние частоты горения разряда на степень затухания гармонических составляющих его электромагнитного поля.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Разряд возбуждался в кварцевой трубке дли-

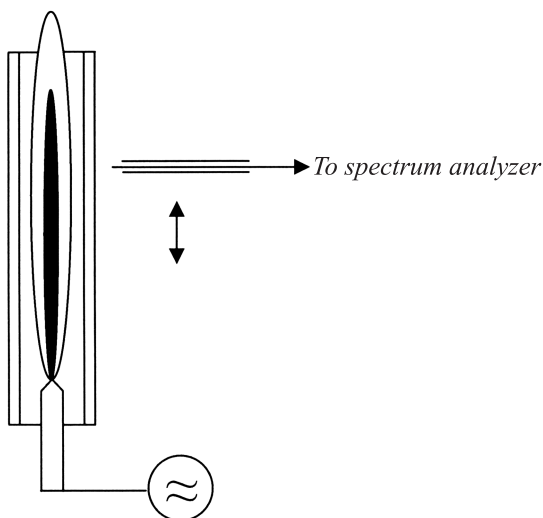


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

ной 500 mm и диаметром 28 mm в среде аргона. Частота электромагнитного поля варьировалась от 36.4 до 39.6 MHz. Расход аргона составлял 0.5 m³/h. Мощность разряда находилась в пределах от 0.5 до 1 kW.

Измерения частотных составляющих электрического поля разряда проводились емкостным зондом, сигнал с которого по линии с двойной экранировкой подавался на вход спектроанализатора GSP-827. Емкостной зонд представлял собой медный штырь диаметром 1 mm и длиной 3–5 mm. Расстояние от оси разряда составляло 60 mm. Одновременно с измерением характеристик электромагнитного поля факельного разряда проводилось измерение электронной температуры плазмы разряда. Измерение электронной температуры проводилось спектрографом Shamrock SR-303i двумя способами. Первый способ — по относительной интенсивности линий меди. Использовались линии: 5106, 5153 и 5218 Å. Значения энергии и относительной вероятности переходов, соответствующих данным линиям, были взяты из работы [2]. Второй способ — по частотной зависимости интенсивности континуума атомов аргона в диапазоне длин волн от 3300 до 4000 Å. Измерения электронной температуры по частотной зависимости интенсивности континуума проводились в соответствии с методикой, изложенной в работе [3].

В результате измерений было установлено, что при горении разряда в диапазоне частот 23–40 MHz электронная температура изменяется незначительно и составляет 8300–8600 K на оси канала разряда и 7600–7900 K на границе между каналом разряда и его диффузионной оболочкой. При уменьшении частоты наблюдается небольшой рост температуры.

Результаты измерения осевого распределения амплитуд первых четырех гармоник электрического поля факельного разряда представлены на рис. 2. Здесь по оси абсцисс отложено расстояние от электрода до точки измерения. По оси ординат — амплитуда сигнала в логарифмическом масштабе. Гармоники более высокого порядка, как правило, имеют величину амплитуды не более 10 dBmV, поэтому в нашем случае они не рассматривались.

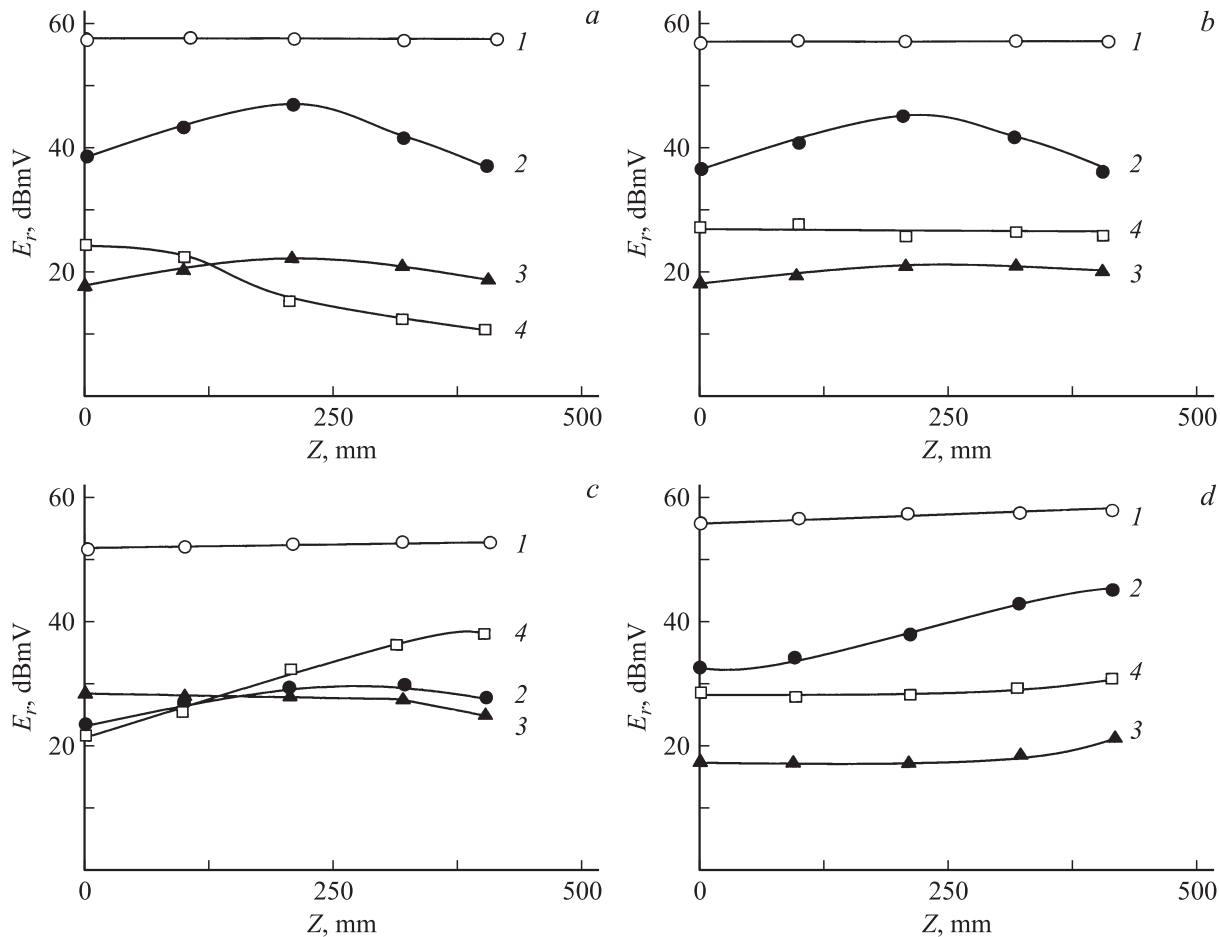


Рис. 2. Осевое распределение гармонических составляющих электрического поля высокочастотного факельного разряда, горящего в аргоне. 1, 2, 3, 4 — первая, вторая, третья и четвертая гармоники соответственно. *a* — 39.6; *b* — 38.4; *c* — 37.4; *d* — 36.4 MHz.

Как видно из рис. 2, наиболее сильно изменяются вдоль оси канала разряда вторая и четвертая гармонические составляющие электромагнитного поля. Характер изменения амплитуд гармоник вдоль оси разряда близок к волнообразному. При этом с изменением частоты горения разряда максимум амплитуды перемещается по осевой координате. Заметим, что четвертая гармоника при частоте 39.6 MHz затухает при распространении вдоль канала разряда в 4 раза. В то же время при частоте 37.4 MHz ее амплитуда, наоборот, увеличивается в 4–4.5 раза. Столь сильное изменение поведения четвертой гармонической составляющей электромагнитного поля при незначительном изменении частоты позволяет предположить наличие резонанса между собственными колебаниями плазмы и колебаниями внешнего электромагнитного поля.

С другой стороны, характер изменения гармонических составляющих поля вдоль оси разряда позволяет предположить существование стоячей волны, возникающей при наложении „прямой“ волны и волны, отраженной в конце канала разряда. Поэтому подобное изменение амплитуды четвертой гармоники может быть также следствием суперпозиции электромагнитных волн. Од-

нако расчет, выполненный нами для случая однородной электрической линии, показал, что переход от выраженного падения к выраженному росту амплитуды поля возможен лишь в случае изменения волнового числа электромагнитной волны в несколько раз. Учитывая, что для случая проводящего цилиндра волновое число пропорционально корню квадратному от частоты, получим, что величина частоты должна измениться минимум в десятки раз. В нашем случае изменение частоты составляет всего 5–7%. Таким образом, полученные нами экспериментальные результаты не могут быть объяснены лишь на основе предположения об отражении электромагнитной волны в конце канала разряда.

Проведем оценку собственных частот аргонной плазмы факельного разряда. Хотя аргонная плазма является неравновесной, можно приближенно оценить концентрацию электронов по формуле Саха для двухтемпературной [4] плазмы. Для вышеприведенных значений электронной температуры она будет составлять $n_e \sim (0.2-1.0) \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$. В этом случае электронная плазменная частота будет находиться в пределах: $\nu_e \sim (1.3-2.8) \cdot 10^{11} \text{ Hz}$, а ионная плазменная частота в диапазоне: $\nu_i \sim (450-1000) \cdot 10^6 \text{ Hz}$. Следовательно,

частота четвертой гармоники $\nu \sim 150$ MHz будет меньше как электронной, так и ионной плазменных частот. Таким образом, для четвертой гармоники электромагнитного поля факельного разряда, горящего в аргоне, выполняется условие параметрического резонанса, которое для неограниченной плазмы [5] имеет следующий вид: $\nu \leq \nu_e$.

Список литературы

- [1] Луценко Ю.Ю., Власов В.А., Тихомиров И.А. // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. Вып. 9. С. 23–27.
- [2] Hess H., Kloss H.-G., Rademacher K., Seliger K. // Beiträge aus der Plasmaphysik. 1962. N 2. P. 171–178.
- [3] Janča J. // Czech. J. Phys. Sec. B. 1967. N 9. P. 761–772.
- [4] Kannan D., Bose T.K. // Phys. Fluids. 1977. Vol. 20. N 10. P. 1668–1673.
- [5] Силин В.П. Параметрическое воздействие излучения большой мощности на плазму. М.: Наука, 1973. 287 с.