

04

О характере затухания электромагнитного поля в плазме высокочастотного факельного разряда

© Ю.Ю. Луценко, В.А. Власов, И.А. Тихомиров

Томский политехнический университет

E-mail: tpu@tpu.ru

Поступило в Редакцию 12 декабря 2005 г.

Приведены измерения осевого распределения амплитуд гармонических составляющих электрического поля высокочастотного факельного разряда, горящего в воздухе и аргоне. Установлен немонотонный характер зависимости коэффициента затухания электромагнитного поля от частоты.

PACS: 52.80.Pi

Ранее нами было установлено [1] отсутствие затухания электромагнитной волны при ее распространении вдоль канала высокочастотного факельного разряда, горящего в воздухе при атмосферном давлении. Этот факт находится в противоречии с „электродинамической моделью“ разряда, предложенной авторами работ [2,3], согласно которой горение разряда осуществляется за счет диссипации энергии волны поперечно-магнитного типа, амплитуда которой уменьшается вдоль канала разряда по экспоненциальному закону. С целью интерпретации полученных результатов нами было выдвинуто предположение о наличии в канале высокочастотного факельного разряда наряду с „прямой“ также и „отраженной“ электромагнитной волны. Это предположение было в определенной степени подтверждено результатами работы [4], автор которой наблюдал посредством высокоскоростной съемки наряду с „прямой“ также и „отраженную“ волну свечения в импульсном факельном разряде.

В настоящей работе с целью дополнительной проверки этого предположения нами были проведены измерения осевых распределений амплитуды радиальной компоненты электрического поля факельного разряда на частотах, значительно превышающих основную частоту горения разряда. Заметим, что коэффициент затухания электромагнитной

волны, распространяющейся вдоль проводящего цилиндра, зависит от частоты по закону $\sim \omega^{1/2}$, где ω — угловая частота электромагнитной волны. Поэтому электромагнитные волны с частотами, значительно превышающими основную частоту горения разряда, будут затухать настолько сильно, что их отражением в конце канала разряда можно будет пренебречь, а их амплитуда вдоль оси разряда будет меняться по закону, близкому к экспоненциальному.

В нашем случае в качестве зондирующих высокочастотных электромагнитных колебаний использовались собственные гармоники высокочастотного генератора. Амплитуды частотных составляющих составляли не более 10...15% от амплитуды основной гармоники, поэтому можно считать, что параметры газоразрядной плазмы определялись основной частотой горения разряда.

Измерения проводились емкостным зондом, сигнал с которого подавался на вход спектроанализатора СК4-59. Емкостный зонд представлял собой медный штырь диаметром 1 мм и длиной 3...5 мм. Разряд возбуждался в кварцевой цилиндрической камере диаметром 32 мм. Частота электромагнитного поля составляла 22.8 МГц. Мощность разряда варьировалась от одного до трех киловатт.

Результаты измерений представлены на рис. 1 и 2 для высокочастотного факельного разряда, горящего соответственно в воздухе и аргоне: по оси абсцисс отложено расстояние от электрода до точки измерения в единицах длины канала факельного разряда, по оси ординат — относительная амплитуда высокочастотного сигнала.

Как видно из рис. 1, затухание электромагнитного поля в воздушной плазме наблюдается лишь при частоте поля, превышающей в 3 раза основную частоту горения разряда. Амплитуда третьей гармоники уменьшается по длине канала разряда в 1.7 раза, амплитуда четвертой гармоники — в 2.1 раза. Отметим, что характер изменения амплитуды гармонических составляющих вдоль оси разряда скорее линейный, чем экспоненциальный. Данный факт говорит о несовершенстве модели канала разряда в виде однородной электрической линии конечной длины. Необходимо учитывать изменение параметров разрядного канала вдоль его оси, в частности осевое распределение удельной электропроводности плазмы разряда.

Из рис. 2 видно, что при горении факельного разряда в среде аргона затухание электромагнитного поля наблюдается лишь у четвертой гармонической составляющей. Более того, при увеличении мощности

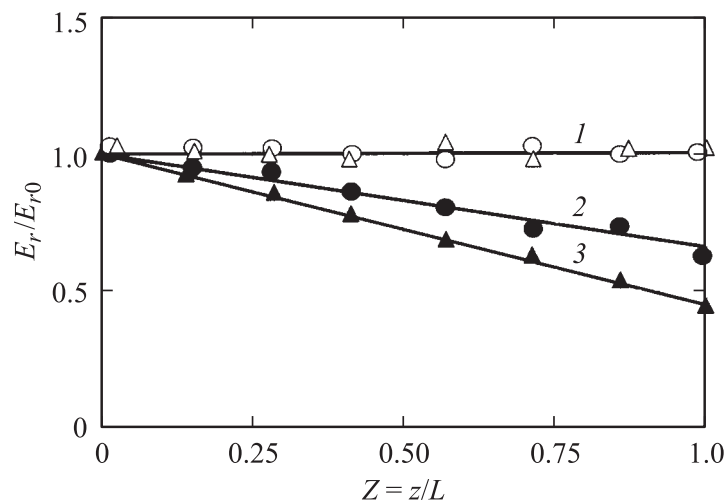


Рис. 1. Осевое распределение гармонических составляющих электромагнитного поля высокочастотного факельного разряда, горящего в воздухе: 1 — 22.8 МГц, 45.6 МГц; 2 — 68.4 МГц; 3 — 91.2 МГц.

разряда до 2.5 . . . 3.0 kW наблюдается рост амплитуды основной гармоники электромагнитного поля вдоль оси разряда.

Таким образом, результаты проведенных измерений позволяют утверждать, что в определенном диапазоне частот, вблизи основной частоты горения разряда, коэффициент затухания электромагнитного поля почти не изменяется. Особенно данный эффект выражен в случае факельного разряда, горящего в среде аргона.

Проведем оценку характерных частот плазмы факельного разряда, горящего в воздухе и аргоне. По данным работы [5] концентрация электронов в воздушной плазме факельного разряда, горящего при атмосферном давлении, составляет $n_e \sim 10^{18} \text{ м}^{-3}$. В работе [6] концентрация электронов в плазме факельного разряда, горящего в аргоне, непосредственно над срезом высокочастотного электрода, оценивается как $n_e \sim 10^{20} \text{ м}^{-3}$. Соответственно электронная и ионная плазменные частоты для воздушной плазмы будут составлять: $\nu_e \sim 9 \text{ GHz}$; $\nu_i \sim 40 \text{ MHz}$. Для аргоновой плазмы факельного разряда: $\nu_e \sim 90 \text{ GHz}$; $\nu_i \sim 330 \text{ MHz}$. Можно заметить, что в случае воздуш-

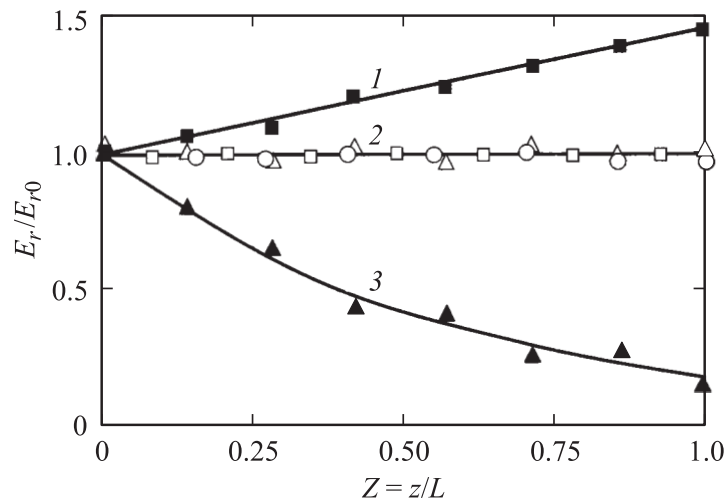


Рис. 2. Осевое распределение гармонических составляющих электромагнитного поля высокочастотного факельного разряда, горящего в аргоне: 1 — 22.8 MHz при мощности разряда $W = 3$ kW; 2 — 22.8 MHz, 45.6 MHz, 68.4 MHz ($W = 1.5$ kW); 3 — 91.2 MHz ($W = 1.5$ kW).

ной плазмы ионная плазменная частота близка к частоте второй гармоники электромагнитного поля, запитывающей разряд. В то же время именно при частотах, превышающих частоту второй гармоники, наблюдается нормальное затухание электромагнитного поля. В случае же аргоновой плазмы ионная плазменная частота получается несколько выше измеряемых нами частот. Однако можно предположить, что в центральной части канала разряда, а не непосредственно над электродом, концентрация электронов, а следовательно и ионная плазменная частота, в несколько раз меньше величины, приведенной в работе [6].

Таким образом, можно предположить, что наблюдаемый нами аномальный характер затухания электромагнитного поля связан с близостью частоты горения разряда к ионной плазменной частоте. По всей видимости, имеет место параметрическое взаимодействие собственных колебаний плазмы с внешним электромагнитным полем.

Список литературы

- [1] *Тихомиров И.А., Луценко Ю.Ю.* // ЖТФ. 1989. Т. 59. В. 11. С. 128–130.
- [2] *Качанов А.В., Трехов Е.С., Фетисов Е.П.* // ЖТФ. 1970. Т. 40. В. 2. С. 340–345.
- [3] *Качанов А.В.* // Тез. докл. VIII Всесоюзн. конф. по генераторам низкотемпературной плазмы. Новосибирск, 1980. С. 107–110.
- [4] *Хальясте А.Я.* // Тез. докл. IV Всесоюзн. конф. по физике газового разряда. Махачкала, 1988. Ч. 1. С. 135–136.
- [5] *Тихомиров И.А., Тихомиров В.В., Соловьев А.А.* и др. // Аппаратура и методы исследований плазмы в ч. разрядов. Томск, 1976. С. 36–45.
- [6] *Janča J.* // Czech. J. Phys. Sec. B. 1967. N 9. P. 780–785.