

04:09

## Особенности электромагнитного поля высокочастотного емкостного разряда шнурового вида, горящего при атмосферном давлении

© Ю.Ю. Луценко

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

(Поступило в Редакцию 15 декабря 2004 г.)

Приведены результаты измерений характеристик электромагнитного поля высокочастотного емкостного разряда, горящего в воздухе и аргоне при атмосферном давлении. Проведено сопоставление экспериментальных результатов с соответствующими результатами, полученными для случая высокочастотного факельного разряда.

В работе [1] предложена модель высокочастотного факельного разряда, согласно которой горение разряда осуществляется за счет диссипации энергии симметричной поверхностной поперечно-магнитной (*ТМ*) волны, распространяющейся вдоль канала разряда. При этом предполагалось, что амплитуда электромагнитной волны уменьшается вдоль канала разряда по экспоненциальному закону. Для объяснения процессов, протекающих в высокочастотном емкостном разряде, авторами работы [2] предложено рассматривать распространение вдоль канала разряда двух *ТМ*-волн: „прямой“ и „отраженной“. Проведенные нами измерения электромагнитного поля высокочастотного факельного разряда [3] показали наличие компонент поля, характерных для поверхностной *ТМ*-волны, и отсутствие затухания амплитуды поля вдоль канала разряда. С целью интерпретации полученных результатов было высказано предположение о наличии в канале факельного разряда как „прямой“, так и „отраженной“ *ТМ*-волны, что нашло подтверждение в результатах работы [4].

Сходство таких физических явлений, как факельный и емкостной разряды, позволяет использовать один и тот же подход. Однако расхождения при оценке их параметров, присутствующих в работах некоторых авторов, не позволяют это утверждать однозначно. Поэтому в настоящей работе нами были проведены измерения характеристик электромагнитного поля высокочастотного емкостного разряда с целью их сопоставления с характеристиками электромагнитного поля высокочастотного факельного разряда.

Измерения проводились емкостными и индуктивными зондами, перемещаемыми в радиальном и осевом направлении относительно плазмоида разряда. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Емкостной зонд представлял собой медный штырь диаметром 1 мм и длиной 3...5 мм. В качестве индуктивного зонда использовалась трехвитковая рамка, навитая из медного провода на тефлоновый цилиндр диаметром 10 мм. Сигнал с зондов подавался на вход осциллографа или фазометра в зависимости от вида измеряемой величины.

Разряд возбуждался в цилиндрической кварцевой камере диаметром 36 мм, охваченной кольцевыми электродами. Частота электромагнитного поля составляла 35.5 МГц. Кольцевые электроды имели диаметр 70 мм и располагались на расстоянии 200 мм друг от друга. Мощность разряда составляла 1.5...2.0 кВт.

В результате проведенных измерений установлено, что в ближней зоне излучения высокочастотного емкостного разряда присутствуют четыре компоненты поля:  $H_\varphi$ ,  $H_r$  — аксиальная и радиальная компоненты магнитного поля,  $E_r$  и  $E_z$  — соответственно радиальная и осевая составляющие электрического поля. Наличие той или иной компоненты магнитного поля определялось посредством вращения рамки в определенной плоскости относительно плазмоида разряда. Зависимость величины  $H_\varphi/H_r$  от радиальной координаты приведено на рис. 2. Измерения величины  $H_\varphi/H_r$ , проведенные без поджига разряда, показали наличие лишь радиальной компоненты магнитного поля. В то же время при горении разряда наблюдается увеличение величины  $H_\varphi/H_r$  с приближением (рис. 2) зондирующей рамки к разрядной зоне. Следовательно, можно предполагать, что вблизи канала разряда ( $r = 1.5...2.0$  мм) преобладают компоненты поля, характерные для симметричной *ТМ*-волны.

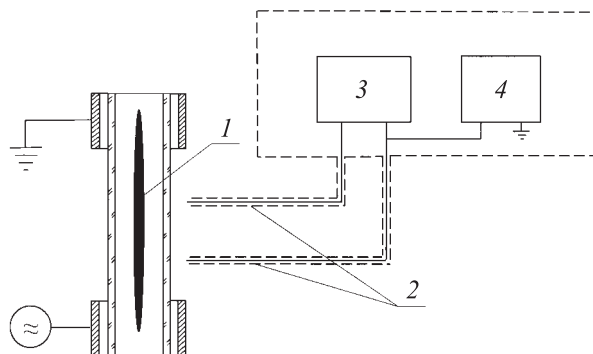
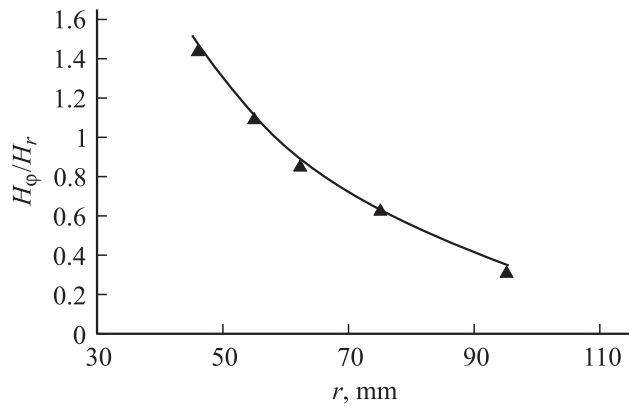
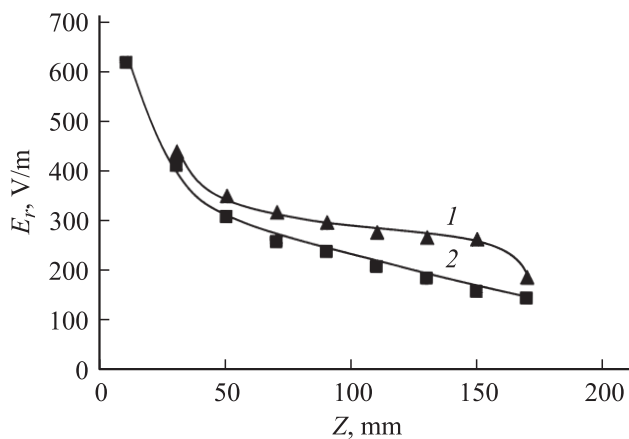


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — разряд, 2 — зонды, 3 — измерительный прибор, 4 — генератор опорного сигнала.



**Рис. 2.** Зависимость величины  $H_\phi/H_r$  от радиальной координаты ( $z = 100$  mm).



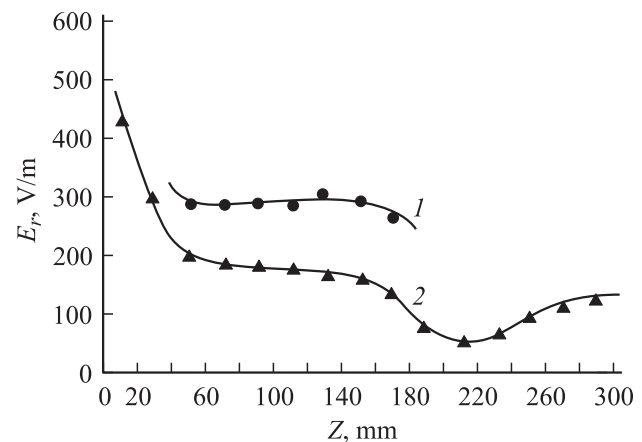
**Рис. 3.** Осевое распределение амплитуды радиальной компоненты электрического поля высокочастотного емкостного разряда для случая воздушной плазмы.  $r = 30$  (1), 50 mm (2).

Результаты измерений амплитуды радиальной компоненты электрического поля вдоль оси разряда представлены на рис. 3 для случая воздушной плазмы и на рис. 4 для случая аргоновой плазмы. Осевые распределения других компонент поля имеют сходный вид. Отсчет осевой координаты на этих рисунках начинается от верхнего края высокочастотного электрода. Как видно из рис. 3 и 4, в осевом распределении компонент поля емкостного разряда можно выделить три зоны. Первая зона находится вблизи высокочастотного электрода, где наблюдается резкое падение амплитуды поля вдоль оси разряда. Ее длина сопоставима с радиусом высокочастотного электрода. Данный участок разряда можно отождествить с зоной формирования поверхностной *TM*-волны. В случае высокочастотного факельного разряда зона формирования поверхностной *TM*-волны практически отсутствует. Это связано с тем, что электрод факельного разряда представляет собой цилиндрический проводник, вдоль которого также распространяется поверх-

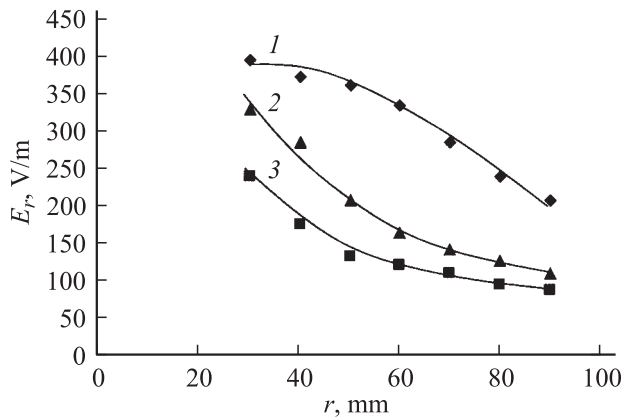
ностная *TM*-волна. В случае же емкостного разряда возбуждение поверхностной *TM*-волны осуществляется кольцевым электродом, в электромагнитном поле которого присутствует радиальная компонента магнитного поля.

После зоны формирования поверхностной *TM*-волны в осевом распределении следует участок, где амплитуда поля меняется незначительно. Распределение компонент поля на этом участке может быть описано суперпозицией двух электромагнитных волн: волны, генерируемой высокочастотным электродом, и волны, отраженной от заземленного электрода. При измерениях осевого распределения поля на более близких расстояниях от оси разряда амплитудная кривая становится более пологой. При этом вдоль центральной части разряда амплитуда поля почти не меняется. Особенно это становится выраженным в случае аргоновой плазмы. При увеличении мощности разряда, горящего в среде аргона, наблюдается даже небольшой рост амплитуды поля вдоль оси разряда. Данный факт можно объяснить большей электропроводностью плазмы разряда, горящего в среде аргона [5], по сравнению с воздушной плазмой. В этом случае затухание электромагнитной волны при распространении вдоль разряда уменьшается и возрастает вклад в распределение поля отраженной электромагнитной волны.

Третий участок в осевом распределении компонент поля характеризуется „провалом“ амплитудной кривой вблизи заземленного электрода, что связано с его экранирующим действием. Влияние заземленного электрода на процесс горения разряда незначительно. Вызываемое им уменьшение амплитуды поля способствует „обрезанию“ канала разряда, горящего в воздухе. В то же время при горении в аргоне „обрезания“ канала разряда не происходит. По всей видимости, отражение электромагнитной волны происходит в конце канала разряда, а не обусловлено наличием заземленного электрода.



**Рис. 4.** Осевое распределение амплитуды радиальной компоненты электрического поля высокочастотного емкостного разряда для случая аргоновой плазмы. 1, 2 — то же, что и на рис. 3.



**Рис. 5.** Радиальное распределение амплитуды радиальной компоненты электрического поля высокочастотного емкостного разряда для случая воздушной плазмы.  $z = 30$  (1) 110 (2), 170 mm (3).

На рис. 5 представлено радиальное распределение радиальной компоненты электрического поля высокочастотного емкостного разряда, горящего в воздухе. Как видно из рис. 5, радиальное распределение может быть описано функцией Ханкеля (кривые 2 и 3), как и в случае [3] высокочастотного факельного разряда, за исключением зоны, примыкающей к высокочастотному электроду (кривая 1).

Аналогично распределение фазового сдвига компонент поля вдоль оси емкостного разряда отличается от распределения фазового сдвига компонент поля вдоль оси факельного разряда [3] лишь на начальном участке разрядного канала.

Таким образом, характер электромагнитного поля высокочастотного емкостного разряда в ближней зоне его излучения сходен с характером электромагнитного поля высокочастотного факельного разряда, за исключением зоны, примыкающей к высокочастотному электроду. Результаты проведенных нами измерений позволяют также утверждать, что вблизи канала емкостного разряда, где локализуется энергия поверхностной  $TM$ -волны, амплитуда поля почти не меняется вдоль оси разряда. Следовательно, факельный и емкостной разряды могут быть описаны единым образом. Некоторые различия в электродинамике факельного и емкостного разрядов могут быть связаны с искусственным „обрезанием“ канала емкостного разряда заземленным электродом, что в свою очередь вызывает определенные изменения в осевом распределении параметров разрядного канала.

## Список литературы

- [1] Качанов А.В., Трехов Е.С., Фетисов Е.П. // ЖТФ. 1970. Т. 40. Вып. 2. С. 340–345.
- [2] Звягинцев А.В., Митин Р.В., Прядкин К.К. // ЖТФ. 1975. Т. 45. Вып. 2. С. 278–285.

- [3] Тихомиров И.А., Луценко Ю.Ю. // ЖТФ. 1989. Т. 59. Вып. 11. С. 128–130.
- [4] Хальясте А.Я. // Тез. докл. IV Всесоюз. конф. по физике газового разряда Махачкала, 1988. Ч. 1. С. 135–136.
- [5] Janca J. // Czech. J. Phys. Sec. B. 1967. N 9. P. 780–785.