

04;09;12

## Инициированный сферический СВЧ-разряд при атмосферном давлении

© А.Я. Кириченко, С.П. Мартынюк, А.П. Моторненко,  
И.Г. Скуратовский, О.А. Суворова

Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины,  
Харьков  
E-mail: briz@ire.kharkov.ua

Поступило в Редакцию 19 февраля 2002 г.

Описан инициированный разряд на конце антенны, расположенной в потоке аргона, вытекающего в свободное пространство в коаксиальном СВЧ-плазмотроне. Обнаружено структурирование СВЧ-разряда при повышенной плотности энергии в плазменном образовании. Изучено влияние геометрических размеров антенны, подводимой мощности и расхода аргона на особенности структурирования разряда.

Исследователей СВЧ-разрядов в последнее время привлекают особенности формирования их структур. При этом основное внимание уделяется установлению областей существования и классификации структур, их развитию в импульсных газоразрядных источниках при средних и высоких давлениях газа, а также изучению физических механизмов, определяющих данную структуру [1–4].

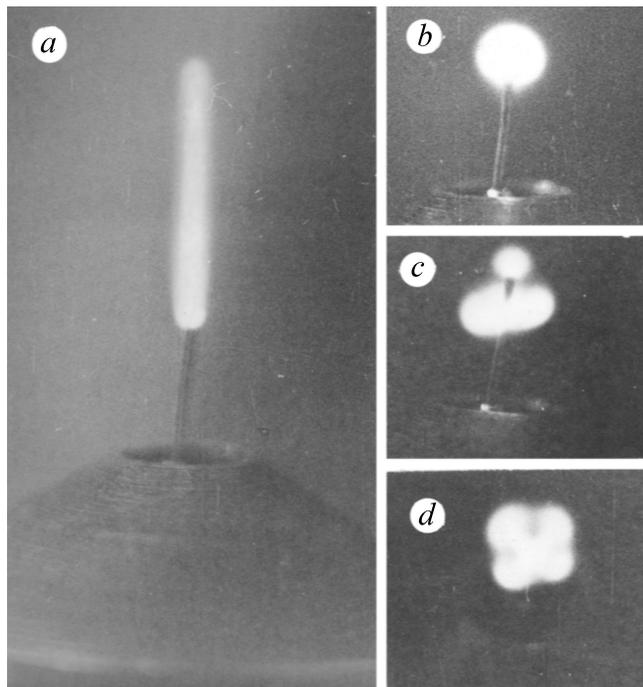
Наряду с этим, как показывают последние исследования [5,6], весьма разнообразной оказывается структура также и стационарных разрядов. Так, в [5] описан электродный шаровой СВЧ-разряд, возникающий на конце антенны в металлической разрядной камере больших размеров в водороде при давлениях 1–15 Торг при воздействии непрерывного излучения СВЧ мощностью до 2.5 kW на частоте 2.45 GHz. В [6] исследован нитевидный СВЧ-разряд (состоящий из одной–семи нитей) при давлении аргона 0.05–1 atm в газоразрядной трубке в волноводе, возбуждаемый непрерывной мощностью 50–500 W на частоте 7 GHz.

Оказывается, что и при атмосферном давлении, используя новую модификацию известного коаксиального СВЧ-плазмотрона, обычно формирующего стационарный факельный разряд [7,8], при определенных условиях можно наблюдать его структурирование. В настоящей рабо-

те приводятся результаты исследования СВЧ-разряда, возникающего на конце тонкой цилиндрической антенны, являющейся продолжением внутреннего проводника коаксиального СВЧ-плазмотрона, в потоке аргона, охватывающего антенну и далее свободно истекающего в окружающее пространство. Нами использовался СВЧ-плазмотрон, запитываемый магнетроном непрерывного действия мощностью до 12 W на частоте 10 GHz, развязанным от генератора плазмы ферритовым циркулятором [7,8]. По существу, плазмотрон представлял волноводно-коаксиальный резонатор, нагруженный на волноведущий тракт на основе прямоугольного волновода сечением  $10 \times 23$  mm. Согласование с волноводом осуществлялось с помощью *T*-образного перехода и выбором положения волноводного короткозамыкающего поршня. Диаметры внутреннего и внешнего проводников коаксиала были равны 4.3 и 10 mm соответственно. Отрезок коаксиала заканчивался формирующим газовый поток соплом. Подача аргона в область разряда осуществлялась между внутренним и внешним проводниками коаксиала. Расход аргона варьировался в интервале 0.3–3 l/min. В отличие от [7,8], на конце внутреннего проводника коаксиала плазмотрона, в его продолжении, располагалась антенна из медной проволоки диаметром 0.2–0.65 mm.

СВЧ-разряд инициировался на конце антенны кратковременной искрой между внутренним и наружным проводниками коаксиала. Как правило, при определенных значениях подводимой СВЧ-мощности и расходе аргона на конце антенны возникал факельный разряд, напоминающий в отдельных случаях „огонь святого Эльма“, существующий в статических полях атмосферного электричества. На рис. 1, *a* приведена фотография факельного СВЧ-разряда на конце антенны при подводимой мощности  $P_0 = 5.3$  W и расходе аргона  $v = 2$  l/min. В разряде можно легко выделить три зоны, обычно наблюдаемые при возбуждении факела высокочастотного разряда: 1) тонкую яркую приэлектродную зону; 2) центральный канал разряда; 3) менее яркую оболочку факела. Длина факела регулируется подводимой мощностью, расходом газа и зависит от длины антенны, выступающей над срезом сопла плазмотрона. Заметим, что аналогичный по форме факел обычно образуется как продолжение внутреннего проводника коаксиала при отсутствии антенны [7].

Однако, как оказалось, есть определенные области подводимой СВЧ-мощности и расхода аргона, при которых разряд структурируется. Например, влияние величины подводимой мощности при расходе аргона



**Рис. 1.** Фотографии свечения СВЧ-разрядов.

0.5 l/min на характер свечения такого СВЧ-разряда иллюстрирует рис. 1, *b, c, d*. Все фотографии представлены в одном масштабе. Снимки на рис. 1, *a, b, c* выполнены в случае, когда ось объектива фотокамеры перпендикулярна оси антенны, а на рис. 1, *d* — под углом  $15^\circ$  к этой оси.

При снижении расхода аргона от 2 до 0.5 l/min длина факела разряда, приведенного на рис. 1, *a*, уменьшается и превращается в небольшую светящуюся сферу, „нанизанную“ на антенну. По мере уменьшения мощности размер сферы монотонно уменьшается вплоть до погасания СВЧ-разряда. С повышением СВЧ-мощности от 5.3 до 6.4 W сфера все более „нанизывается“ на антенну, конец которой доходит до ее центра (рис. 1, *b*). При дальнейшем увеличении СВЧ-мощности при

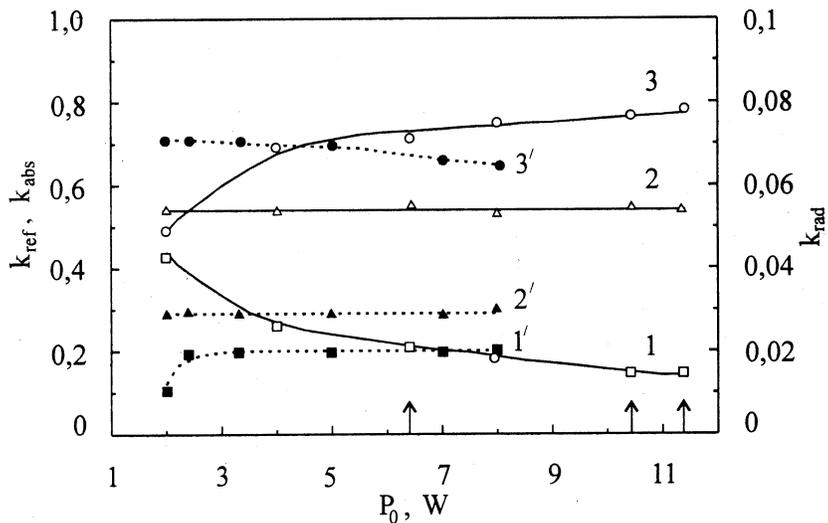


Рис. 2. Энергетические характеристики СВЧ-разрядов.

$P_0 = 10.4$  W свечение разряда скачком приобретает вид, представленный на рис. 1, с. Кроме уменьшенного в диаметре сферического разряда на конце антенны, ближе к срезу сопла дополнительно появляется структурированное плазменное образование. Оно состоит из нескольких ярко светящихся сфер, расположенных вокруг оси антенны и вписанных в тороид с осью, совпадающей с осью антенны. Диаметр этих сфер несколько меньше диаметра одиночной сферы, показанной на рис. 1, b, причем расстояние до сферы, расположенной на конце антенны, возрастает с уменьшением расхода аргона. С ростом подводимой СВЧ-мощности число сфер в тороиде растет, создавая строго симметричную фигуру. Для примера, на рис. 1, d приведено плазменное образование из четырех сфер, полученное при подводимой мощности 11.4 W.

Энергетические характеристики структурированного СВЧ-разряда изучались с использованием обычной микроволновой техники (поляризационных аттенуаторов, направленных ответвителей, детекторных секций и т.п.). На рис. 2 приведены зависимости коэффициентов отражения  $k_{ref}$ , излучения  $k_{rad}$  и поглощения  $k_{abs}$  структурированного

СВЧ-разряда от величины подводимой мощности  $P_0$  при расходе аргона 0.5 l/min (кривые 1–3 соответственно). Стрелками отмечены величины  $P_0$ , соответствующие наблюдаемым структурам разряда (рис. 1, *b, c, d*). На этом же рисунке штриховыми кривыми 1'–3' для сравнения приведены аналогичные зависимости для обычного факельного СВЧ-плазмотрона в отсутствие антенны. Со стороны большой мощности кривые 1'–3' ограничены пробоем между внутренним и внешним проводниками коаксиала.

Величина  $k_{rad}$  определялась с использованием измеренной диаграммы направленности излучения СВЧ-плазмотронов с антенной без разряда, а также с разрядом, соответствующим условиям рис. 2. Для всех трех случаев, представленных на рис. 1, *b, c* и *d*, диаграмма направленности оставалась практически неизменной и сходной с излучением несимметричного четвертьволнового вибратора. В балансе мощностей омические потери в резонаторе и антенне не учитывались.

На основе полученных экспериментальных данных можно отметить следующее. Как в работе [6] увеличение подводимой мощности приводит к росту числа нитей, так и в нашем случае увеличение мощности приводит к скачкообразному росту числа сферических плазменных образований, но при этом коэффициенты отражения, излучения и поглощения меняются слабо. В то же время, в отличие от [5], размер сфер СВЧ-разрядов с увеличением мощности в нашем случае уменьшался, что хорошо видно из рис. 1. По-видимому, это связано с тем, что наши эксперименты выполнены при атмосферном давлении газа.

Коэффициент поглощения в случае структурированного разряда (рис. 2) остается на том же уровне, что и в случае факельного разряда обычного плазмотрона, однако несколько возрастает с ростом подводимой мощности. Обращает на себя внимание, что наличие антенны, хотя и приводит к росту излучения примерно в 3 раза, тем не менее оно остается невысоким, ниже 6%.

Следует заметить, что, как показал эксперимент, наблюдаемые сферические формы СВЧ-разрядов сохраняются при изменении ориентации оси сопла „эльматрона“ (в том числе „вверх“ и „вниз“) при фиксированных режимах питания, что свидетельствует об электродинамической основе формирования наблюдаемых структур.

Как следует из рис. 2, коэффициенты поглощения как факельного, так и сферического разрядов примерно совпадают, что позволяет, используя данные работы [9], заключить, что и в случае „эльматрона“

в СВЧ-разряде устанавливается концентрация электронов в плазме, при которой возможно существование поверхностной волны. Оценки показывают, что при формировании сферического разряда плотность электромагнитной энергии в единице объема может превышать плотность энергии в факеле; при этом радиус сферы разряда примерно соответствует размеру скин-слоя. Качественное совпадение результатов настоящей работы с результатами работы [6], несмотря на различие структур разрядов (нить и сфера), позволяет заключить о сходных механизмах их образования: форма и размер плазменной структуры обуславливаются максимальной поглощенной мощностью.

## Список литературы

- [1] Бровкин В.Г., Колесниченко Ю.Ф. // Письма в ЖТФ. 1991. Т. 17. В. 1. С. 58–61.
- [2] Вихарев А.Л., Горбачев А.М., Ким А.В. и др. // Физика плазмы. 1992. Т. 18. В. 8. С. 1064–1075.
- [3] Грачев Л.П., Есаков И.И., Мишин Г.И. и др. // ЖТФ. 1994. Т. 64. В. 1. С. 74–88.
- [4] Грачев Л.П., Есаков И.И., Мишин Г.И. и др. // ЖТФ. 1996. Т. 66. В. 7. С. 32–45.
- [5] Бардош Л., Лебедев Ю.А. // ЖТФ. 1998. Т. 68. В. 12. С. 29–33.
- [6] Сковорода А.А., Звонков А.В. // ЖЭТФ. 2001. Т. 119. В. 1. С. 91–93.
- [7] Мартынюк С.П., Моторненко А.П., Усиков А.Я. // Доклады АН УССР. Сер. А. 1975. № 8. С. 734–737.
- [8] Мартынюк С.П., Моторненко А.П. // Доклады АН УССР. Сер. А. 1978. № 2. С. 161–164.
- [9] Motornenko A.P., Schunemann K. // Int. J. Electron. Commun. 2001. V. 55. N 5. P. 337–341.