

04; 09; 12

© 1991

СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ИНИЦИИРОВАННОГО  
РАЗРЯДА В СВЧ-ПОЛЕ КРУГОВОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ

В.Г. Б р о в к и н, Ю.Ф. К о л е с н и ч е н к о

Ранее в работах [1, 2] были начаты исследования вопросов структурообразования в инициированном СВЧ разряде сантиметрового диапазона с линейной поляризацией излучения. Было показано, что область существования инициированного разряда может быть разбита на структурные зоны (СЗ), в пределах которых механизм образования структуры разряда и характер его распространения не претерпевают качественных изменений. Оказалось, что в каждой СЗ можно выделить характерный структурный элемент, названный нами базовым, на основе которого происходит формирование структуры разряда в целом. В ряде газов были исследованы две структурные зоны, являющиеся универсальными. В первой (т.н. волновой СЗ) развитие разряда идет по стримерному механизму, а базовым элементом является синусоида с пространственным периодом  $\sim \lambda/4$ , где  $\lambda$  — длина волны СВЧ излучения. Во второй (т.н. дипольная СЗ) развитие разряда в пространстве происходит скачкообразно, а базовым элементом является полуволновой диполь. В работах [1-3], кроме того, было высказано предположение, что базовые элементы выполняют функцию приемной антенны, расходуя СВЧ-энергию на воспроизводство структуры в новых областях пространства.

В настоящей работе представлены результаты исследований структурообразования в инициированном разряде, создаваемом в свободном пространстве в воздухе СВЧ полем круговой поляризации. Как и ранее, эксперименты проводились в сходящемся пучке СВЧ излучения с частотой 7 ГГц. Давление менялось в диапазоне 70-760 Тор, напряженность электрического поля СВЧ волны не превышала значения 3 кВ/см, длительность одиночного импульса варьировалась от нескольких микросекунд до миллисекунды. Разряд регистрировался одновременно с помощью двух фотокамер, одна из которых находилась спереди под углом  $48^\circ$  к оси излучения, а другая — в фокальной плоскости излучателя сбоку от разряда. Методика выявления структурных особенностей разряда изложена в [1]. Результаты экспериментов дают основания утверждать, что и в случае круговой поляризации излучения, создающего разряд, сохраняются выделенные ранее структурные зоны.

В СЗ, аналогичной волновой, распространение разряда происходит также по стримерному механизму, т.е. путем непрерывного в пространстве развития каналов, составляющих структуру разряда.

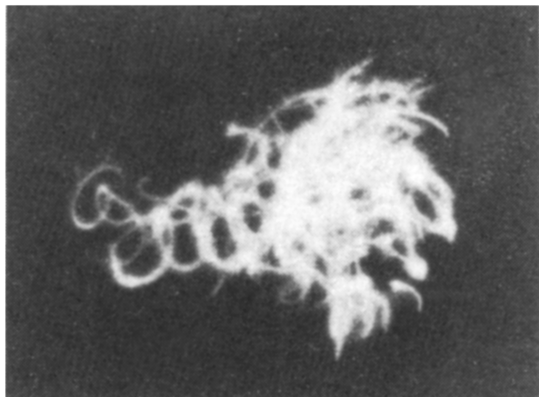


Рис. 1. Фото СВЧ разряда с базовым элементом типа спирали; вид спереди ( $p = 200 \text{ Тор}$ ,  $\tau = 70 \text{ мкс}$ ,  $E \approx 1.5 \text{ кВ/см}$ ).

Однако базовым элементом в этом случае является не синусоида, а спираль с шагом и диаметром  $\ll \lambda/4$  (рис. 1). Поляризация спирали всегда совпадает с поляризацией падающей электромагнитной волны. Разряд формируется из основного и дополнительных каналов. Основной канал развивается в виде спирали. Из ее кончика в процессе роста, как правило, стартуют „лидерные“ каналы, один из которых „прокладывает“ путь основному, а другие образуют дополнительные боковые каналы. Последние могут замыкаться на остающиеся сзади витки спирали или обрываться в межканальном пространстве. Диаметр основного спирального канала близок к значениям 1–1.2 мм, каналов замыкания витков спирали – 0.5–0.6 мм, „лидерных“ каналов – 0.2 мм. Тот факт, что в основе структуры разряда, создаваемого полем круговой поляризации, в волновой структурной зоне (ВСЗ) лежит спираль, делает понятным вывод работы [4] об отсутствии качественных различий в структуре такого разряда при наблюдении по любому направлению, перпендикулярному направлению распространения излучения.

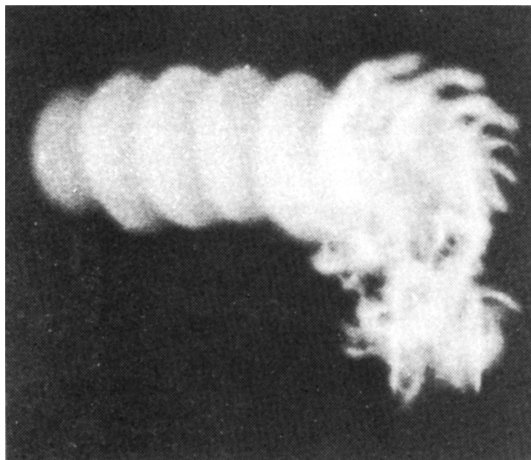
В СЗ, аналогичной дипольной, распространение разряда происходит скачками. Базовым элементом этой зоны является круг диаметром  $\lambda/2$  (рис. 2), причем реальное распределение поля в сходящемся пучке превращает круг в „тарелку“. Расстояние между последовательно возникающими в процессе развития разряда „тарелками“ составляет величину  $\lambda/4$ .

Динамические характеристики разряда, зависимость скорости его распространения навстречу излучению от амплитуды электрического поля СВЧ волны и давления газа, как получено и в [4], практически идентичны случаю линейной поляризации.

Исходя из совокупности экспериментальных результатов по структурообразованию в ВСЗ инициированного СВЧ разряда и соображений, изложенных в [5], нами сформулировано уравнение траектории стримера в плоской электромагнитной волне эллиптической поляризации. Уравнение траектории выглядит следующим образом:

$$\vec{r}'' = k, \sin \psi \frac{\lambda}{2\pi} (\vec{r}' \times \vec{k}),$$

Рис. 2. Фото СВЧ разряда с базовым элементом типа круг; вид спереди ( $\rho = 70 \text{ Тор}$ ,  $\tau = 20 \text{ мкс}$ ,  $E \approx 2.1 \text{ кВ/см}$ ).



$$k_{\vec{r}} \frac{\alpha}{\lambda} \frac{E^* E_n^3}{E_1^2 E_2^2},$$

где  $\vec{k}$  - волновой вектор,  $\vec{r}'$  - единичный вектор касательной,  $E_1$  и  $E_2$  - величины большой и малой осей эллипса поляризации,  $E^* = \sqrt{E_1^2 + E_2^2}$ ,  $E_n$  - амплитуда проекции электромагнитного поля на направление, перпендикулярное вектору скорости и волновому вектору,  $\Psi$  - угол между векторами  $\vec{r}'$  и  $\vec{k}$ ,  $\alpha$  - функция, слабо зависящая от  $E_1/E_2$ .

Уравнение описывает движение по геодезическим линиям поверхности цилиндра, образующие которого параллельны вектору  $\vec{k}$ , а главное сечение есть эллипс с размерами пропорциональными  $E_1$  и  $E_2$ . Движение по траектории не меняет угла  $\Psi$ , под которым стример продвигается навстречу излучению. В предельных случаях круговой и линейной поляризаций излучения траекториями являются, соответственно, спираль и „пила“ [5].

Модель скачкообразного распространения разряда в СЗ, аналогичной дипольной, мало отличается от таковой для случая линейной поляризации излучения [6].

Проведенные эксперименты расширяют и укрепляют базу представлений о механизме развития инициированного СВЧ разряда. Очень важным, на наш взгляд, является факт совпадения поляризационных характеристик базового элемента СЗ и создающего структуру разряда СВЧ излучения. Это еще одно свидетельство в пользу представления о базовом элементе как самоорганизующейся приемной антенне бегущей волны. В зависимости от СЗ и поляризации излучения реализуются базовые элементы в виде диэлектрической, спиральной, синусоидальной и других антенн [7-8], а их размеры обеспечивают режим осевого излучения.

Одновременно приведенные результаты заостряют ряд вопросов, не затрагивавшихся ранее. Основной из них - локальный физический механизм, посредством которого стример в ВСЗ „выбирает“ траекторию движения. Мы полагаем, что активная область СВЧ-стримера [5] является той пространственной областью, где и

происходят определяющие в конечном итоге траекторию стримера процессы. К сожалению, в силу быстротечности развития разряда, элементов стохастичности в его формировании, а также малости пространственной области, занимаемой активной областью, пока не удается проследить происходящие здесь процессы структурообразования с помощью средств скоростной фоторегистрации. Результаты же ряда косвенных экспериментов позволяют предположить, что в активной области СВЧ стримера постоянно зарождаются и стартуют более тонкие и быстрые, нежели он сам, стримеры. Продвижение основного канала происходит путем выделения энергии в тех стримерах, совокупность параметров которых (включая пространственную ориентацию) обеспечивает наилучшее согласование с хорошо проводящей частью структуры, т.е. с базовым элементом. Этот механизм, весьма напоминающий развитие длинной искры на этапе прокладки канала [9], вероятно является общим при формировании ветвящихся структур [10].

Авторы выражают признательность Е.Я. Кузовлеву и А.Н. Кирчо за помощь, оказанную при подготовке и проведении эксперимента, а также Ю.Я. Бухареву, обеспечившему получение материалов фоторегистрации.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Б р о в к и н В.Г., К о л е с н и ч е н к о Ю.Ф. // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. В. 3. С. 55-59.
- [2] Б р о в к и н В.Г., К о л е с н и ч е н к о Ю.Ф. // Письма в ЖТФ. 1991. Т. 17. В. 1. С. 58-62.
- [3] Б а р а н о в В.В., Б р о в к и н В.Г. // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. В. 15. С. 39-43.
- [4] Г р и ц и н и н С.И., К о с с ы й И.А., Т а р а с о в а Н.М. // Письма в ЖТФ. 1985. Т. 11. В. 15. С. 924-929.
- [5] К о л е с н и ч е н к о Ю.Ф. Некоторые вопросы физики иницированного СВЧ-разряда и его использования в целях очистки дымовых газов ТЭС. Сб.: Радиационно-плазмохимические методы в экологии. М.: МРТИ АН СССР. 1989. С. 24-39.
- [6] B r o v k i n V.G., K o l e s n i t c h e n k o Yu. In: Proceed. of XX. Int. Conf. on Phen. in Ion. Gases, Pisa, Italy, 1991.
- [7] Ю р ц е в О.А., Р у н о в А.В., К а з а р и н А.Н. Спиральные антенны. М.: Советское радио, 1974. 224 с.
- [8] К ю н Р. Микроволновые антенны. Л.: Судостроение, 1967. 520 с.
- [9] Б а з е л ь я н Э.М., Р а ж а н с к и й И.М. Искровой пробой в воздухе. Новосибирск: Наука, 1988. 168 с.
- [10] К о л е с н и ч е н к о Ю.Ф. Двумерная модель формирования структур с ветвлениями. Препринт 9002. М.: МРТИ АН СССР, 1990.

Поступило в Редакцию  
4 июля 1991 г.