

04

© 1990

КЛАССИФИКАЦИЯ СТРУКТУР ИНИЦИИРОВАННОГО СВЧ РАЗРЯДА

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

В работах [1, 2] показано, что формирование сильнонеоднородной структуры иницированного СВЧ разряда высокого давления в воздухе происходит по стримерному механизму, а основу кажущейся хаотичной структуры составляет регулярный базовый элемент. Для дальнейшего понимания закономерностей структурообразования иницированного разряда исключительно важен вопрос о границах существования различных структур, фактически не затронутый в упомянутых работах. Целью настоящей работы является определение областей существования и классификация структур иницированного разряда, возникающих в различных газах при вариации напряженности электрического поля СВЧ излучения и давления.

Эксперименты проводились в воздухе, технически чистых азоте, гелии, углекислом газе и водороде с процентной добавкой метана. Схема эксперимента и методика изучения структурных характеристик разрядов та же, что и в [1]. Длительность одиночных импульсов линейно поляризованного СВЧ излучения ($f = 7$ ГГц) варьировалась от 2 до 700 мкс.

Анализ результатов проведенных экспериментов позволит разбить область существования иницированного разряда на несколько структурных зон (СЗ), имеющих место во всех исследованных газах. Каждая СЗ имеет присущий только ей базовый элемент, на основе которого случайным или детерминированным образом идет формирование структуры разряда в целом. При вариации внешних параметров в пределах СЗ образование структуры, как и характер распространения разряда, определяется единым механизмом, не претерпевающим качественных изменений. Между соседними структурными зонами существует узкая переходная область. Переход от одной СЗ к другой сопровождается качественным изменением структуры и характера распространения разряда и появлением (в пренебрежении шириной переходной области) излома на логарифмическом графике скорости распространения разряда от напряженности электрического поля волны либо давления газа.

Исследованная в [1, 2] структура с синусоподобным (волновым) базовым элементом принадлежит СЗ, определяемой условиями $E > E_*$ и $E/\rho < (E/\rho)_*$, где E — напряженность электрического поля волны, ρ — давление газа. В исследованных газах значение E_* составляет (1.2–1.8) кВ/см (первая цифра соответствует гелию, вторая — углекислому газу). Отсюда следует,

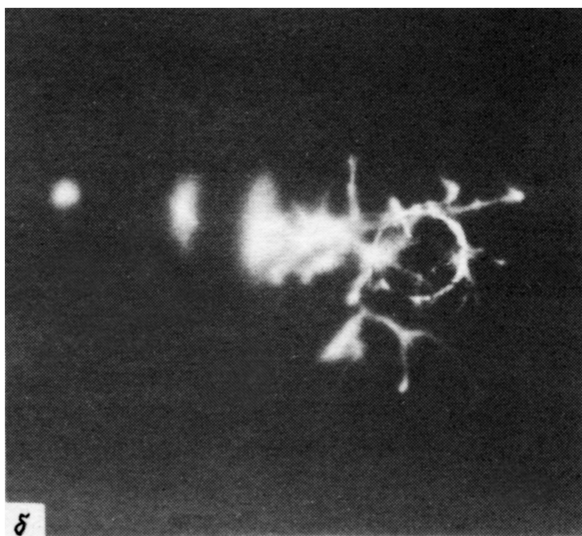
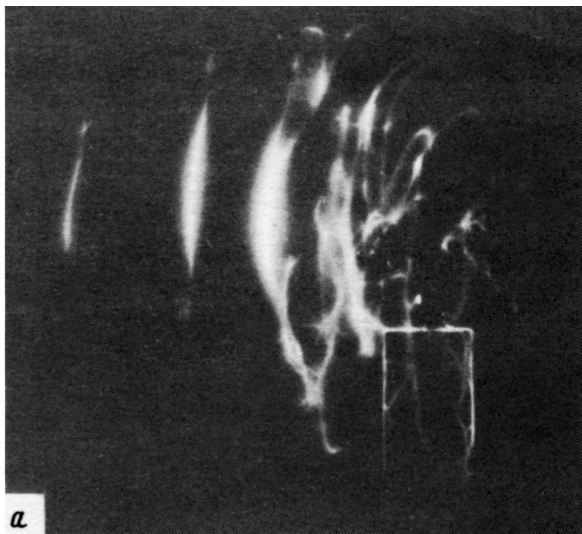


Рис. 1. Фотографии СВЧ разряда в двух проекциях (дипольная СЗ). Гелий, $p = 600$ Тор, $\tau = 10$ мкс, $E = 2.8$ кВ/см. Излучение идет слева. а - вектор E лежит в плоскости рисунка, б - вектор E перпендикулярен плоскости рисунка.

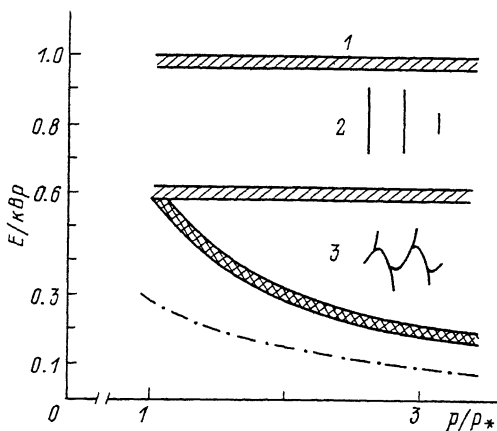


Рис. 2. Разбиение области существования инициированного разряда на универсальные СЗ. 1 - область структур самостоятельного СВЧ разряда, 2, 3 - дипольная и волновая СЗ инициированного СВЧ разряда (схематично изображены базовые элементы). Пунктиром показан примерный порог инициации разряда, штриховкой - переходные области.

что для каждого газа существует критическое давление p_* , ниже которого указанная структура реализоваться не может. Эксперимент дал следующие приблизительные значения критического давления: воздух, N_2 - 70 Тор, CO_2 - 50 Тор, H_2 - 150 Тор, He - 500 Тор. Базовый элемент этой СЗ в основе своей не зависит от рода газа, хотя в деталях имеет свои особенности. Поэтому все сказанное в [1] о формировании структуры в воздухе относится в целом и к другим исследованным газам.

Следующая СЗ определяется условием $(E/\rho)_* < E/\rho < (E/\rho)_{пр}$, где $(E/\rho)_{пр}$ соответствует пробойному значению E/ρ газа в пучке СВЧ волн (без инициатора). Здесь распространение разряда имеет скачкообразный характер. Базовым элементом этой СЗ является полуволновой диполь, ориентированный вдоль вектора E волны. Расстояние между последовательно образующимися в пространстве диполями составляет приблизительно величину $\lambda/4$, где λ - длина волны излучения (рис. 1). Образование диполей происходит по стримерному механизму. Вначале на оси пучка на расстоянии $\lambda/4$ от предыдущего диполя зарождается лавина самостоятельного пробоя. Лавина быстро трансформируется в стример [3], вырастающий до размеров полуволны падающего излучения. Далее картина повторяется. Значение $(E/\rho)_*$ составляет около 0.6 значения $(E/\rho)_{пр}$. Структура стабильно воспроизводится от импульса к импульсу, что, видимо, связано с появлением областей самостоятельного пробоя в суммарном поле падающей и отраженной от диполя электромагнитной волны. При рассеянии волны на полуволновом

полю на расстоянии $\lambda/4$ от него суммарное поле максимально и превышает падающее примерно в 1.6 раза, что, как мы полагаем, и объясняет происхождение и величину коэффициента 0.6.

При $E < E_*$, но выше порога инициации разряда существуют, по крайней мере, еще две СЗ, одна из которых – хорошо изученный термический разряд [4, 5]. В настоящей работе мы не рассматриваем эти зоны, как и СЗ при $\rho < \rho_*$.

Границы структурных зон, описанных выше, можно представить в универсальном, не зависящем от рода газа виде. Определим критическое давление ρ_* . Заметим, что $(E/\rho)_{пр} = kV$, где k – коэффициент, слабо зависящий от рода газа и других параметров (для оценок $k \approx 0.1$), V входит в выражение для константы ионизации $k_i \sim e\chi\rho(-B\rho/E)[4]$. Тогда нетрудно получить $\rho_* \approx 16 E_*/V$, что дает неплохое согласие с экспериментальными значениями критического давления. В безразмерных координатах $E/kV\rho$ и ρ/ρ_* картина разбиения области существования иницированного разряда на структурные зоны универсальна (рис. 2). Полученные результаты свидетельствуют об электродинамической основе в формировании структуры иницированного, то есть подпорогового разряда. В этом аспекте иницированный разряд, как оказалось, мало отличается от разряда самостоятельного (т.е. надпорогового). Основное отличие состоит в том, что в волновой СЗ иницированного разряда воспроизводимость структуры от импульса к импульсу типологическая, а не абсолютная. Кроме того, совокупность данных свидетельствует о том, что реализующаяся в заданных условиях структура обеспечивает наибольшую скорость распространения разряда навстречу потоку СВЧ энергии.

Таким образом, в работе найдены универсальные структурные зоны в области существования иницированного СВЧ разряда, что является одной из предпосылок к построению универсальной динамической модели СВЧ разряда в свободном пространстве.

Авторы выражают признательность В.В. Баранову, Н.И. Батуровой и Б.Н. Королеву за помощь, оказанную при проведении экспериментов.

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. 55–58.
- [2] 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.
- [3] Г и л ь д е н б у р г В.Б., Г у ш и н И.С., К и м А.В. Тез. докл. II Всесоюз. совещ. „Высокочастотный разряд в волновых полях“. Куйбышев: КГПИ, 1989. С. 33–34.
- [4] Р а й з е р Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1987. 592 с.
- [5] Б о р о д а ч е в а Т.В., С е м е н о в В.Е. // ЖТФ. 1985. Т. 55. В. 9. С. 1743–1747.

Поступило в Редакцию
14 августа 1990 г.