

03;04;12

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ФРОНТА СОСТОЯНИЯ ПЛАЗМЫ В СТРУЕ КАПИЛЛЯРНОГО РАЗРЯДА

© С.Е.Емелин, Н.К.Белшьева, Г.Е.Скворцов,
Е.В.Безниско, А.К.Хассани, В.С.Семенов

Исследовался найденный ранее вариант капиллярного разряда, отличающийся наличием периодически возникающих скачков режима кернообразования, связанных с развитием акустических колебаний в канале. Значительная быстрота распространения фронта изменения состояния плазмы во внешней части струи по сравнению с движением вещества указывает на природу керна как вынужденное динамическое состояние метастабильной энергоемкой плазмы, индуцированное волновым воздействием из зоны разряда и сопряженное с ним.

В исследованиях, описанных в [1], был обнаружен особый режим капиллярного разряда, плазма струи которого обладает рядом интересных свойств. Плазменный объем, истекающий из канала со скоростью ~ 100 м/с, имеет вид стержня со сложной структурой, содержащей так называемый "кern", "оболочку" и "шубу". Прохождение керна через атмосферу не сопровождается его разрушением, а реакция на воздействие преград в виде отверстий, щелей выявляет тенденцию керна к сохранению себя как единого целого. Наблюдается эффективное взаимодействие керна с металлической мишенью, приводящее к выделению значительной доли энергии, вложенной в разряде. Высокая плотность энергии ($10-100$ Дж/см³) сочетается с низкими газовой ($T_g \sim 1000$ К) и электронной ($T_e \sim 0.5$ эВ) температурами. По комплексу свойств плазма керна похожа на вещество шаровой молнии, физическая природа которой также не ясна.

В наших исследованиях, представленных в [2], был найден вариант аналогичного [1] режима, отличающийся наличием нелинейных колебаний тока и параметров плазмы, содержащих резкие скачки режима плазмогенератора и связанных с развитием акустических колебаний в канале. Целью данной работы было исследование распространения фронта состояния плазмы во внешней части струи. Быстрота распространения этого фронта по сравнению с движением плазмы проливает свет на природу керна как вынужденное, индуцированное динамическое состояние метастабильной энергоемкой плазмы.

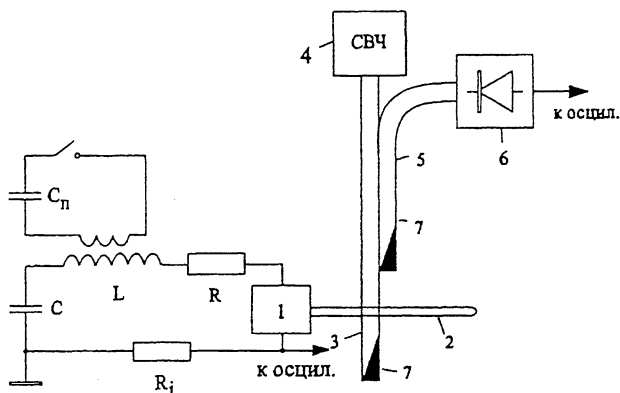


Рис. 1. Схема питания разрядника и СВЧ-измерений: 1 — разрядник, 2 — kern, 3 — волновод, 4 — СВЧ-генератор, 5 — направленный ответвитель, 6 — детектор отраженного сигнала, 7 — согласованные нагрузки.

Для эксперимента использовался генератор эрозионной плазмы, аналогичный [1], отличающийся наличием ограничивающего ток сопротивления $R = 100 \text{ Ом}$ (рис. 1) и увеличенной длиной канала разрядника $l = 20 \text{ мм}$ при диаметре $d = 2 \text{ мм}$. $C = 0.8 \text{ мФ}$, $L = 0.5 \text{ мН}$, $C_{\text{п}} = 0.1 \text{ мкФ} \times 5 \text{ кВ}$. Разрядник на основе полиэтиленовой трубки $9 \times 1.4 \text{ мм}$. В качестве внутреннего положительного электрода использовался завинчивающийся в трубку стальной стержень с резьбой диаметром 2 мм. Начальное напряжение накопителя $U_{\text{н}} = 1300 \text{ В}$, конечное $U_{\text{к}} = 1100 \text{ В}$. Контроль режима плазмогенератора осуществлялся по осциллограмме величины тока разряда (сигнал с резистора $R_i = 0.1 \text{ Ом}$), а состояния плазмы — по осциллограмме величины мощности отраженного от струи СВЧ-сигнала на частоте 9.5 ГГц (рис. 1). Плазменная струя пересекала прямоугольный волновод $28 \times 12 \text{ мм}$ в середине его широкой стенки вдоль электрического поля волны H_{01} . Середина волновода находилась на расстоянии 1 см от торца трубки разрядника.

Начальная часть импульса тока разряда $t = 2-4 \text{ мс}$ связана с установлением режима испарения на стенке канала и при более низких начальных напряжениях заканчивается обрывом тока. Токовый слой в плазме имеет форму трубки — режим поперечного разряда. При больших напря-

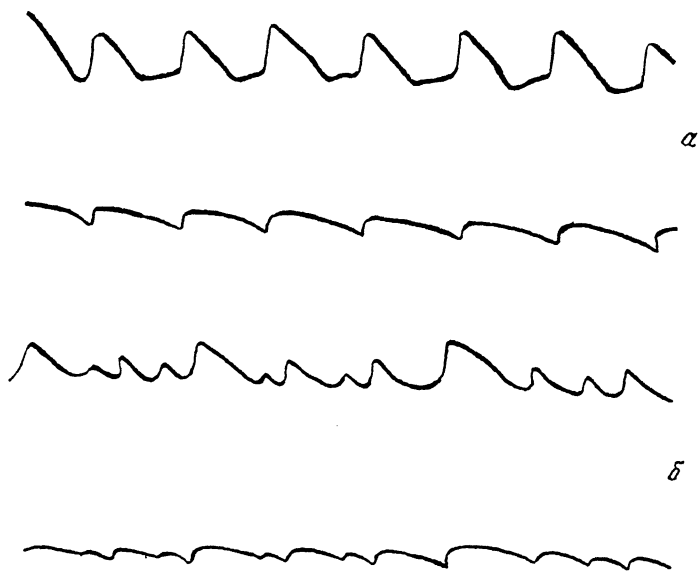


Рис. 2. Осциллограммы мощности отраженного сигнала (нулевая линия вверху) и тока разряда (нулевая линия внизу). Длительность развертки 1 мс; период меток, разрешаемых на фронтах, 2 мс. а — частота пульсаций 7.5 кГц; б — многочастотный режим.

жениях по истечении указанного времени устанавливается устойчивый режим продольного разряда, сопровождающий кернообразование. С уменьшением напряжения в течение импульса возникают периодические пульсации режима, проявляющиеся в плавном уменьшении и скачкообразном восстановлении величины тока. Отсутствие фазы восстановления тока приводит к завершению импульса.

Частота колебаний при длине канала $l = 20$ мм лежит в основном диапазоне 5–35 кГц и растет с уменьшением диаметра и длины канала, с увеличением мощности разряда.

Длительность фронта восстановления тока $\tau_{\phi} = 1-5$ мкс и зависит от относительной величины пульсаций, что соответствует влиянию дросселя в схеме $\tau_{сх} = L/R = 5$ мкс. При больших величинах L пульсации становятся горбообразными, а затем и гармоническими.

В результате исследований выяснилось, что фронт возрастания тока при данной точности измерений, ограниченной величиной индуктивности L , синхронизирован с фронтом уменьшения СВЧ-отражений (рис. 2), имеющим длительность менее 10 мкс. Следовательно, фронт состояния плазмы перемещается на расстояние более 1 см за время ме-

нее 10 мкс, т. е. скорость его распространения $V_{\phi} > 1$ км/с, в то время как скорость струи почти на два порядка меньше. Это означает, что, во-первых, состояние ядра в плазме не существует независимо, а транслируется из плазмогенератора посредством быстро перемещающегося внешнего воздействия и при отключении (изменении) его быстро релаксирует. Во-вторых, воздействие, приводящее к возникновению состояния ядра, создаваемое генератором в некоторых режимах и распространяющееся по струе, судя по скорости его распространения, имеет волновую природу. Это могут быть звуковые, плазменные, электромагнитные волны, уединенные волны и потоки компонентов плазмы. Здесь возможны различные случаи, но наиболее вероятными представляются композиционные, структурированные варианты. Имеется количественное соответствие между параметрами внешнего воздействия и возникающего состояния.

Учитывая эти данные, можно предложить следующую схему явления. Испаренное и деструктурированное вещество со стенки канала под воздействием излучения и в разряде приобретает возбуждение (электронное, колебательное, вращательное) с высокой средней удельной энергией $W_{at} = 5-10$ эВ/атом. Ввиду малости времени энергозложения оно неравновесно, доля тепла мала $W_{at}/W_T > 30$, имеется превышение электронной температуры над газовой, высока также колебательная температура $T_{vmax} = 15\,000$ К. Образуется метастабильное вещество из возбужденных атомов, молекул, кластеров и более крупных частиц. Ядро является реакцией этой активной среды на внешнее направленное воздействие и возникает как относительно устойчивое когерентное динамическое состояние в результате взаимодействия потока энергии и метастабильного вещества.

Список литературы

- [1] Авраменко Р.Ф., Базгин Б.И. и др. // ЖТФ. 1990. Т. 60. № 12. С. 57-64.
- [2] Емелин С.Е., Семенов В.С. и др. // Шаровая молния в лаборатории. Сб. статей. М.: Химия, 1994. С. 87-95.

Научно-исследовательский
институт физики
Санкт-Петербургский
университет

Поступило в Редакцию
21 октября 1996 г.