

СФЕРИЧЕСКИЕ СТРАТЫ В ТЛЕЮЩЕМ РАЗРЯДЕО.А.Нерушев, С.А.Новопашин¹⁾, В.В.Радченко, Г.И.Сухинин

Институт теплофизики Сибирского отделения РАН

630090 Новосибирск, Россия

Поступила в редакцию 15 сентября 1997 г.

После переработки 17 октября 1997 г.

Экспериментально обнаружена стратификация объемного тлеющего разряда. Зарегистрированы сферически-симметричные стационарные страты.

PACS: 51.50.+v, 52.80.Nc

Появление свящихся и темных областей в положительном столбе тлеющего разряда в трубках (страты) – явление, известное еще с 1843 г. [1]. К настоящему времени установлено, что природа страт состоит в ионизационной неустойчивости и само явление называют ионизационными волнами [2–6]. Насколько известно авторам, до настоящего времени отсутствуют как экспериментальные, так и теоретические исследования стратификации объемного тлеющего разряда.

В настоящей работе представлено экспериментальное наблюдение в объемном тлеющем разряде трехмерных страт, представляющих собой ряд вложенных друг в друга свящихся поверхностей, имеющих форму, близкую к сферической.

Эксперименты проведены в стальной цилиндрической вакуумной камере (рис.1). Размеры камеры: высота 60 см, диаметр 50 см. Величина предельного давления, до которого она может быть откачана, – 10^{-2} Па. После откачки объем может быть заполнен различными газами. Эксперименты выполнены в статических (без расхода газа) условиях в диапазоне давления 2–50 Па. В камеру радиально на половине ее высоты введен высоковольтный кабель без экранирующей оплетки. Свободный от изоляции конец диаметром 0.3 см и длиной 1 см расположен в геометрическом центре камеры. Внутренняя поверхность вакуумной камеры является катодом. Для питания разряда используется высоковольтный регулируемый источник питания с максимальным напряжением 1 кВ. Величина тока определяется регулировочным балластным сопротивлением и меняется до максимального значения 40 мА. Падение напряжения на разряде составляет около 400 В. Вакуумная камера оснащена фланцами с четырьмя стеклянными окнами диаметром 15 см на полувывоте камеры для визуального наблюдения и фоторегистрации с различных ракурсов.

При положительном напряжении на внутреннем электроде вокруг него наблюдается набор концентрических, вложенных одна в другую, сферических свящихся областей (страт). Сферическая симметрия областей свечения основана наблюдением из различных окон. Фотография наблюдаемого явления приведена на рис.2. Характерный размер свящейся области составляет 10 см (при внимательном рассмотрении фотографии можно видеть подводящий кабель, диаметр которого составляет 9 мм). В экспериментах наблюдалось от одиночной страты до более десятка (на рис.2 можно видеть четыре страты). Стационарная картина свечения может наблюдаться в течение нескольких минут.

¹⁾ e-mail: sanov@itp.nsc.ru

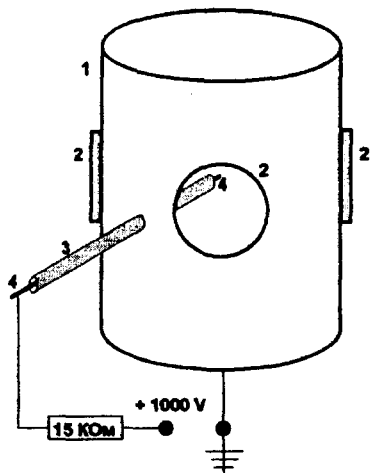


Рис.1. Экспериментальная установка: 1 – вакуумная камера, 2 – окна, 3 – изолятор, 4 – центральный электрод

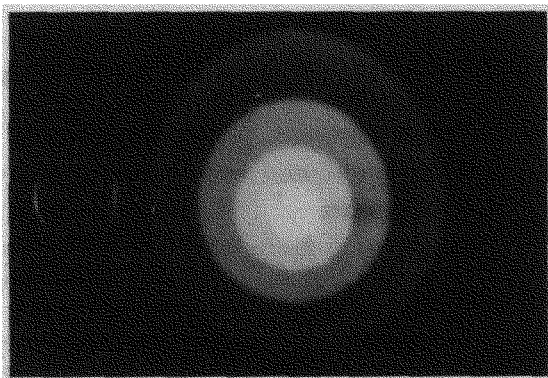


Рис.2. Свечение стратифицированного разряда

Размер страт зависит от давления и состава газа. Зависимость абсолютной величины радиуса страт от давления близка к обратно пропорциональной. На рис.3 показана зависимость радиуса страты от ее номера. Радиусы нормированы на радиус центральной светящейся зоны. Начиная со второй страты, зависимость может быть аппроксимирована следующим образом:

$$r_n/r_0 = \alpha^n = e^{\beta n}, \quad (1)$$

Коэффициенты α и β зависят от условий горения разряда. Экспериментальные значения α лежат в диапазоне 1.4–2. Страты наблюдались в молекулярных газах: воздухе, азоте, CO_2 . Добавление высокомолекулярного газа (пары ацетона, бензола) приводит как к увеличению количества страт, так и к уменьшению их размеров (уменьшается коэффициент α в формуле (1)). В чистом аргоне страты не наблюдались в исследованном диапазоне давлений. Однако добавление молекулярного газа приводило к возникновению стратификации. Страты не наблюдаются и при другой полярности источника питания. В этих условиях напряжение на разряде значительно выше (около 1 кВ), а ток значительно меньше (около 2 мА). В заключение экспериментальной части следует отметить аналогию наблюдаемого явления с двойными слоями [7], которые наблюдались в объемном тлеющем разряде в среде аргоне, но в условиях потока газа и градиента концентрации газа в области разряда.

Приведем некоторые оценки параметров разряда. Известно, что для стратифицированного разряда в трубках падение напряжения между стратами постоянно. Этот скачок напряжения связан с потерями энергии электронов в неупругих столкновениях [4,6]. Предположим, что такая же ситуация реализуется и в трехмерном случае. Учитывая экспериментально измеренную зависимость расстояния между стратами и напряжение на разряде Φ , удастся оценить зависимость потенциала от радиуса (наличие объемного заряда изменяет распределение потенциала) и распределение объемного заряда, $\rho(r)$. Электрический потенциал n -ой страты с учетом (1)

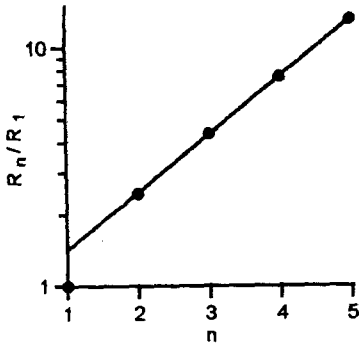


Рис.3. Зависимость радиуса страт от их номера

может быть представлен в следующей форме:

$$\varphi(r_n) = \Phi - \varphi_0 n = \Phi - \varphi_0 \ln(r_n/r_0)/\beta.$$

Величина φ_0 зависит от вида газа, его энергетического спектра и сечений потерь энергии электронами. Обычно эта величина составляет несколько электрон-вольт и коррелирует с энергией первого электронного возбуждения ϵ_1 (или потенциала ионизации газа). Предположим, что сглаженный потенциал между анодом и катодным слоем может быть представлен аналогичным выражением:

$$\varphi(r) = \Phi - \varphi_0 \ln(r/r_0)/\beta, \quad E(r) = -\partial\varphi(r)/\partial r = \varphi_0/\beta r. \quad (2)$$

Из уравнения Пуассона получаем распределение объемного заряда: $\rho(r) = \varphi_0/4\pi\beta r^2$. Нетрудно видеть, что нарушение квазинейтральности плазмы связано с наличием избыточного числа ионов.

Полагая, что ток разряда J связан преимущественно с электронами, оценим концентрацию электронов $n_e(r)$ из соотношения

$$j_e(r) = J/4\pi r^2 = -en_e(r)\mu_e E(r), \quad (3)$$

где $j_e(r)$ – плотность электронного тока, μ_e – подвижность электронов. Из сопоставления (2) и (3) видно, что плотность электронов обратно пропорциональна радиусу. Подставляя численные значения для коэффициента подвижности μ_e [5] и плотностей токов $j_e(r)$, для всех расстояний, начиная с размера анода, получим, что нарушение квазинейтральности мало:

$$\rho(r) = \rho_i(r) - \rho_e(r) \ll \rho_e(r).$$

В заключение сделаем несколько замечаний общего характера. Во-первых, сферически-симметричная стратификация разряда является устойчивой (эксперименты проведены в цилиндрической камере, а страты обладают ярко выраженной сферической симметрией).

Во-вторых, несмотря на малую величину нарушения нейтральности, наличие объемного заряда, по-видимому, существенно влияет на распределение потенциала, приводя к автомодельному закону (1) в пространственном расположении страт.

В-третьих, существование трехмерных страт упрощает решение проблемы стратификации тлеющего разряда в связи с отсутствием стенок. С математической точки зрения задача становится одномерной.

В-четвертых, в положительном столбе тлеющего разряда в трубках продольное электрическое поле практически постоянно (приближенно имеет место трансляционная симметрия). Поэтому наблюдение неподвижных страт для разряда в трубках связано с наличием каких-либо неоднородностей в области положительного столба [4–6]. Для трехмерного случая сильные градиенты электрического поля сами служат неоднородностью. Это, по-видимому, является причиной того, что в наших экспериментах наблюдались лишь неподвижные страты.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант 96-02-19045.

-
1. M.Abria, *Ann. de chimie (Annales de chimie et de physique)* **7**, 462 (1943).
 2. А.В.Недоспасов, *УФН* **94**, 439 (1968).
 3. Л.Пекарек, *УФН* **94**, 463 (1968).
 4. L.D.Tsendin, *Plasma Sources Sci. Technol.* **4**, 200 (1995).
 5. Ю.П.Райзер, *Физика газового разряда*, М.: Наука, 1987.
 6. Ю.В.Голубовский, С.У.Нисимов, *ЖТФ* **66**, 20 (1996).
 7. L.Conde and L.Leon, *Phys. Plasmas* **1(8)**, 2441 (1994).