

04;12

Роль диффузионного тока в формировании сферических страт

© О.А. Нерушев, С.А. Новопашин, В.В. Радченко, С.З. Сахапов

Институт теплофизики СО РАН, Новосибирск
E-mail: sanov@itp.nsc.ru

Поступило в Редакцию 28 мая 2003 г.
В окончательной редакции 26 августа 2003 г.

Проведены экспериментальные исследования сферического разряда постоянного тока при различной полярности напряжения. Показано, что сферическая стратификация при прочих идентичных условиях наблюдается только для положительного разряда (центральный электрод является анодом). На основании анализа полученных данных сделан вывод о том, что диффузионная составляющая тока играет определяющую роль в формировании сферических страт в тлеющем разряде.

Стратификация положительного столба газового разряда постоянного тока в трубках — известное и описанное явление [1–4]. В работах [5,6] экспериментально зарегистрирована стратификация газового разряда в сферической геометрии разрядного промежутка. В настоящее время продолжают экспериментальные и теоретические исследования этого явления [7–11]. Геометрические различия разрядов в трубках и в сферической геометрии приводят к отличиям плазменных характеристик, основные из которых состоят в следующем:

1. Плотность тока в линейном случае постоянна вдоль линий тока, в то время как в сферическом разряде она возрастает к центральному электроду.
2. Рекомбинационные процессы при разряде в трубках в основном происходят на стенках трубки, для сферического же случая рекомбинация может происходить только в объеме.
3. Вследствие радиальной неоднородности сферического разряда полный ток определяется не только дрейфом электронов в электрическом поле, но и их диффузией.

4. Для сферического разряда задача становится строго одномерной в отличие от разряда в трубках, когда необходимо учитывать поток заряженных частиц на стенки трубки.

Для любой полярности не стратифицированного сферического разряда концентрация электронов возрастает с уменьшением радиуса, что приводит к тому, что диффузионное движение всегда направлено от центра. Для положительного разряда дрейф электронов под действием электрического поля направлен к центру, т.е. противоположно диффузионному движению. Для отрицательного разряда дрейфовое и диффузионное движения совпадают. Сохранение полного тока в стационарном случае осуществляется в результате баланса диффузионного и дрейфового токов:

$$n\mu E - D \frac{dn}{dr} = \frac{J}{4\pi e r^2}. \quad (1)$$

Здесь e , n , μ , D — заряд, концентрация, подвижность и коэффициент диффузии электронов соответственно; E — электрическое поле; J — полный ток; r — радиус. Цель настоящей работы состоит в исследовании роли диффузионной составляющей в формировании сферических страт. Для этого проведены исследования сферического разряда при различной полярности в широком диапазоне токов.

Экспериментальная установка. Эксперименты проведены в стальной цилиндрической вакуумной камере 60 см высотой и 50 см в диаметре. Один из электродов располагался в геометрическом центре камеры. Заземленные стенки камеры выполняли функцию второго электрода. Ввод центрального электрода в камеру осуществлялся через стенки камеры внутри кварцевой трубки, которая служила изолятором. Только небольшой участок электрода был не изолирован. На него мог устанавливаться сферический электрод радиусом 0.25–2.5 см. В качестве источника питания использовался конденсатор емкостью 400 μF , заряженный до напряжения 1–2 кВ положительного либо отрицательного знака. Разряд осуществляется через балластное сопротивление 12 к Ω . При разряде конденсатора напряжение на нем уменьшалось, что приводило к уменьшению тока. Вольт-амперные характеристики разряда были получены при одновременной регистрации протекающего тока в цепи и напряжения на разрядном промежутке. Синхронно с измерением вольт-амперных характеристик осуществлялась видеорегистрация свечения

разряда. Это позволило определить диапазон токов, при которых происходит стратификация разряда. Перед началом эксперимента камера откачивалась до давления остаточного газа 0.1 Па, а затем заполнялась рабочей газовой смесью. Приведенные ниже экспериментальные данные получены в смеси азота с 50% содержанием паров ацетона при полном давлении смеси 14.5 Па.

Результаты и обсуждение. Изменение напряжения и тока разряда со временем для положительной и отрицательной полярности центрального электрода показаны на рис. 1, *a, b* соответственно. Вольт-амперные характеристики без учета знака приведены на рис. 2. Видеорегистрация свечения разряда показала, что стратификация разряда наблюдается только при положительной полярности центрального электрода. Так, при токе 0.02 А наблюдалось четыре страты, диаметр максимальной составлял около 10 см (рис. 3). Для положительного разряда размер центрального электрода не оказывает существенного влияния на электрические характеристики разряда и собственно на явление стратификации. Вольт-амперная характеристика положительного разряда соответствует нормальному тлеющему разряду — при изменении тока в широких пределах напряжение практически остается постоянным. При обратной полярности центральный электрод является катодом. Для того чтобы перекрыть диапазон токов, соответствующий условиям формирования страт в положительном разряде, использован центральный электрод радиусом 2.5 см, так как при малом размере катода развивались токи, значительно меньшие по сравнению со случаем, когда в центре камеры находился анод. Вольт-амперная характеристика отрицательного разряда соответствует аномальному тлеющему разряду, что связано с относительно малой площадью катода. Наиболее важный результат состоит в том, что для исследованного диапазона токов 0.002–0.05 А стратификация разряда наблюдается для положительного разряда.

На основании измеренных вольт-амперных характеристик оценим вклады диффузионного и дрейфового токов. Положим, что диффузионный ток мал. Тогда из формулы (1) в пренебрежении диффузией получим зависимость концентрации электронов от радиуса:

$$n = \frac{J}{\mu E \pi e r^2}.$$

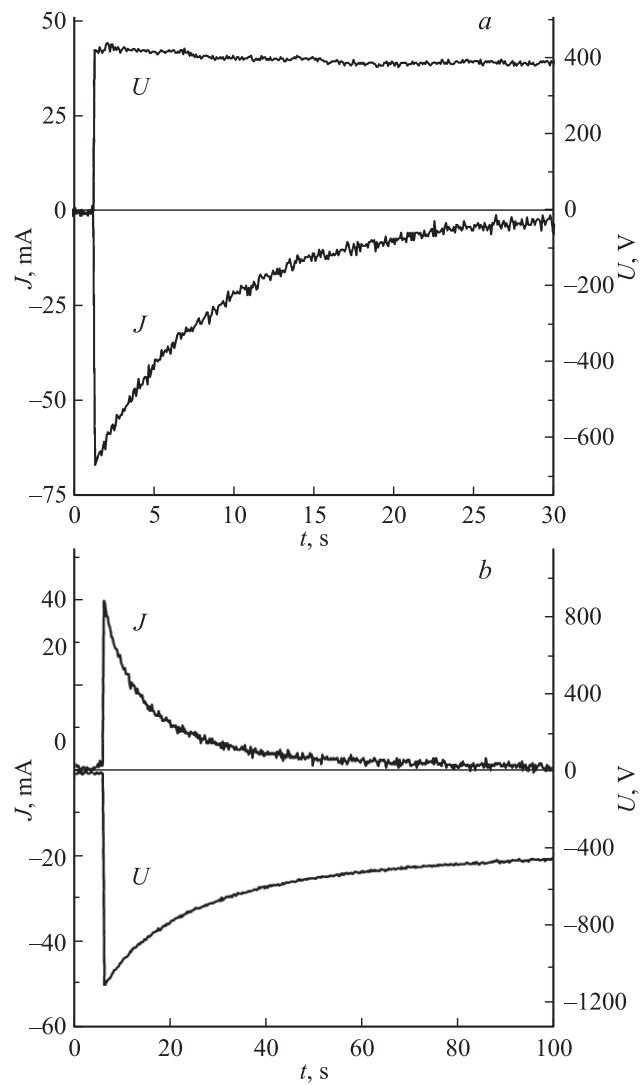


Рис. 1. Зависимости напряжения на разрядном промежутке и протекающего тока при полярности центрального электрода: a — положительной, b — отрицательной.

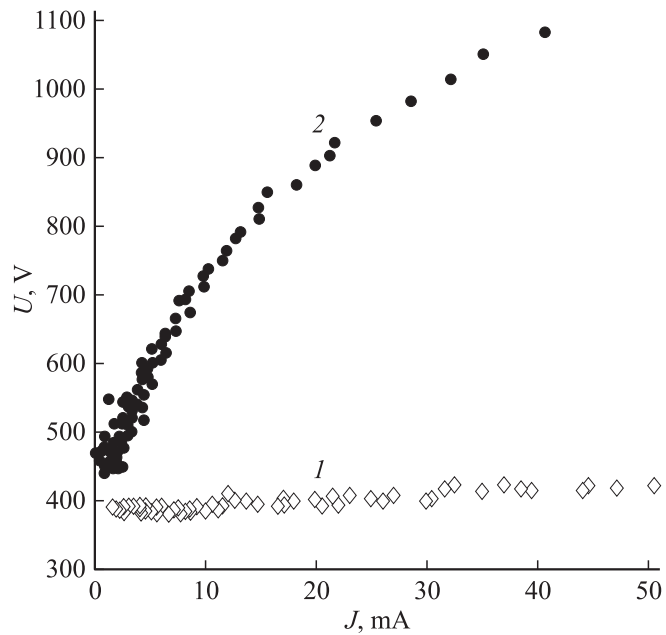


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики для положительной (1) и отрицательной (2) полярности центрального электрода.

Полагая, что вне катодного слоя величина электрического поля постоянна, можно оценить вклад диффузионного тока

$$eD \frac{dn}{dr} = D \frac{2J}{\mu E 4\pi r^3}.$$

Сопоставляя абсолютные величины токов, получим:

$$\left| \frac{J_{diff}}{J_{dr}} \right| = \frac{2D}{r\mu E}.$$

Используя формулу Эйнштейна, связывающую коэффициенты подвижности и диффузии, имеем:

$$\left| \frac{J_{diff}}{J_{dr}} \right| = \frac{2kT}{erE}.$$

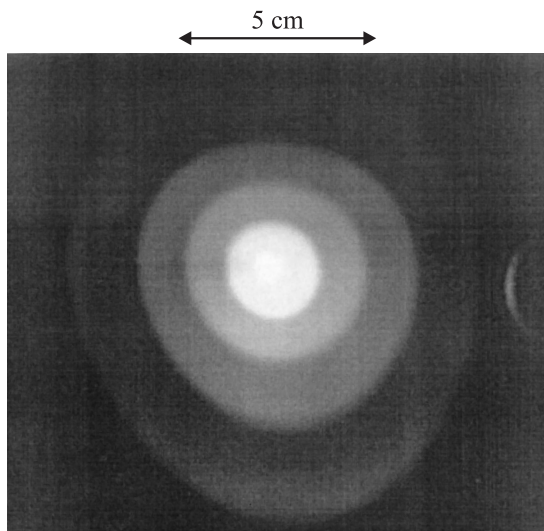


Рис. 3. Фотография стратифицированного сферического газового разряда через 15 s после начала разряда. Стрелкой показан пространственный масштаб.

Напряженность электрического поля в положительном столбе тлеющего разряда в трубках составляет величину $E/p \sim 4 \text{ V}/(\text{cm} \cdot \text{Torr})$ [4]. Полагая, что в рассматриваемой области разряда реализуется такое же электрическое поле, для использованного в экспериментах давления имеем $E \sim 0.4 \text{ V}/\text{cm}$. В результате получаем, что для характерной температуры электронов $\sim 1 \text{ eV}$ на расстоянии $r \sim 5 \text{ cm}$ дрейфовый и диффузионный токи становятся близкими. Так как в положительном разряде диффузионный и дрейфовый токи вычитаются, а в отрицательном складываются, то для обеспечения одного и того же полного тока в положительном разряде реализуется более высокая плотность электронов. Заметим, что наличие двух противоположных токовых вкладов может явиться источником неустойчивости разряда, так как каждый из рассмотренных электронных потоков может существенно возрастать при сохранении величины полного тока. На основании проведенного качественного анализа экспериментальных результатов можно сделать вывод о том, что диффузионная составляющая тока играет

определяющую роль в формировании страт в сферической геометрии разряда.

В заключение заметим, что строгий анализ устойчивости положительного и отрицательного разрядов достаточно сложен, так как он должен включать реальную зависимость подвижности электронов от приведенного электрического поля, процессы баланса заряженных частиц, уравнение Пуассона, ток ионов, образование отрицательных ионов, метастабильных частиц и плазмохимические реакции. Кроме того, для более строгого анализа диффузионно-дрейфовое приближение может оказаться несправедливым, и потребуется использование кинетического подхода.

Работа выполнена по гранту МНТЦ № 1425 „Сферические ионизационные волны“.

Список литературы

- [1] Пекарек Л. // УФН. 1968. Т. 94. С. 463.
- [2] Недоспасов А.В. // УФН. 1968. Т. 94. С. 439.
- [3] Ланда П.С., Мискинова Н.А., Пономарев Ю.В. // УФН. 1980. Т. 132. С. 601.
- [4] Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М: Наука, 1987.
- [5] Нерушев О.А., Новопашин С.А., Радченко В.В. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1997. Т. 66. № 11. С. 679.
- [6] Nerushev O.A., Novopashin S.A., Sukhinin G.I. et al. // Phys. Rev. E. 1998. V. 58. N 4. P. 4897–4902.
- [7] Conde L., Leon L. // IEEE T Plasma SCI. 1999. V. 27 (1). P. 80–81.
- [8] Conde L., Ibanez L.F., Ferro-Fontan C. // Phys. Rev. E. 2001. V. 64. N 4. P. 6402–6404.
- [9] Sigenefer F., Sukhinin G.I., Winkler R. // Plasma Chem. and Plasma Proc. 2000. V. 20. N 1. P. 87–110.
- [10] Hoshi Y., Yoshida H., Tsutsui Y. // J. Appl. Phys. 2002. V. 92. N 10. P. 5668–5672.
- [11] Нерушев О.А., Новопашин С.А., Радченко В.В. и др. // Физика плазмы. 2000. Т. 26. № 1. С. 81.