УДК 537.52

СФЕРИЧЕСКИ СИММЕТРИЧНЫЙ ГАЗОВЫЙ РАЗРЯД

Сахапов С.З., Замчий А.О., Серебрякова М.А.

Институт теплофизики СО РАН, Новосибирск, Россия

Работа подготовлена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 - 2013 годы» (Соглашение № 8698) и РФФИ (грант № 12-08-31195 мол_а).

АННОТАЦИЯ

Проведены эксперименты по получению вольтамперных характеристик и параметров сферически симметричного газового разряда в различной полярности. Для стабильного горения разряда при отрицательной полярности размеры центрального электрода были увеличены на порядок. В экспериментах использовался цельный металлический электрод – была использована вся поверхность электрода, а также полый сферический электрод, состоящий из нескольких металлических колец (сферическая сетка). Обнаружено, что изменение размеров центрального электрода значительно меняло характеристики разряда – при увеличении диаметра стратификация в тлеющем разряде возникала при более высоких токах.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение структур в газовом разряде является достаточно сложной задачей, поскольку включает в себя комплекс проблем, связанных с необходимостью учета плазмохимических процессов и их нелокальности; процессов, происходящих на электродах; неравновесной функции распределения электронов по энергии; возникновением объемного заряда; необходимостью решения самосогласованной задачи. Уже более ста лет усилия экспериментаторов и теоретиков направлены на изучение явления стратификации разряда в трубках. Основные характеристики таких разрядов хорошо изучены [1-4] и предложены несколько моделей для описания этого явления, как в инертных, так и в молекулярных газах [4-10]. Стратификация тлеющего разряда сферической геометрии впервые наблюдалась в 1997 году [11,12]. Разряд такой геометрии имеет ряд особенностей, которые не позволяют объяснить природу стратификации физическими моделями, предложенными для описания страт в трубках. Существенным отличием разряда сферической геометрии является отсутствие стенок, рекомбинация на которых играет важную роль в образовании и поддержании устойчивых ионизационных волн в трубках. Другими важными особенностями сферического разряда являются: непостоянство плотности тока вдоль разрядного промежутка; наличие диффузионной составляющей тока; стратификация наблюдается при определенной полярности центрального и внешнего электродов. Все это свидетельствует о том, что для объяснения стратификации сферического разряда (как и разрядов другой геометрии в отсутствие стенок) необходимо строить новую физическую модель явления. Таким образом, актуальность работы определяется возможностью получения новых фундаментальных знаний о развитии неустойчивостей в газовом разряде, связанными со сферической стратификацией, что позволит понять физическую природу явления и найти области практического приложения полученных результатов. Публикации [11,12] привели к появлению нового направления в физике газового разряда – исследованию сферически стратифицированных разрядов, или, как часто называют сферических двойных слоев. Несмотря на значительные усилия, как российских, так и зарубежных исследовательских групп в различных странах остается ряд вопросов, касающихся природы плазменных неустойчивостей, параметров подобия и детального понимания механизмов самоорганизации страт в плазме газового разряда сферической геометрии пока нет.

© Сахапов С.З., Замчий А.О., Серебрякова М.А.

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. Таким образом, 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. Последние измерения температуры электронов, показало, что на появление неустойчивостей может повлиять также и термодиффузия. Тем не менее, все экспериментальные и теоретические исследования были проведены при положительной полярности центрального электрода. Настоящее исследование направлено на изучение сферического газового разряда, как при положительном, так и отрицательном потенциале на центральном электроде. В экспериментах использовался цельный металлический электрод – была использована вся поверхность электрода, а также полый сферический электрод, состоящий из нескольких металлических колец (сферическая сетка).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Эксперименты проводились в стальной цилиндрической заземленной вакуумной камере высотой 60 см и диаметром 50 см с окнами для визуального, фото и видео наблюдения газового разряда (рис. 1.).

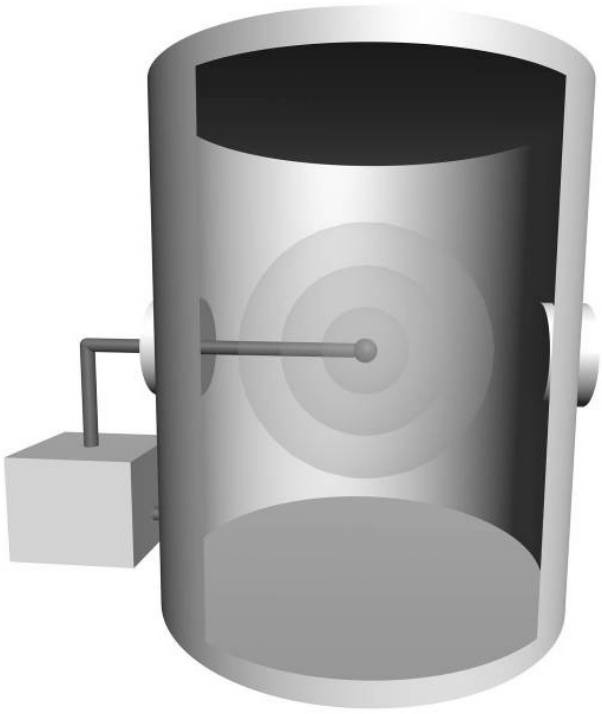

Рис.1 Экспериментальная установка.

В центр камеры помещался стальной электрод, имеющий форму шара диаметром 15 см, либо сетки. На центральный электрод подавалось положительное или отрицательное напряжение относительно земли. Для этого были подготовлены источники положительного и отрицательного напряжения постоянного тока мощностью до 600 Вт с максимальным напряжением 1 А. Перед проведением экспериментов камера обжигалась путем отжига в разряде аргона в течение нескольких часов. Исследуемый газ подавался либо из баллона, предварительно наполненный газом, либо из стеклянной колбы, в которой находился этиловый спирт. Измерения проводились в динамическом режиме подачи газа (вакуумный насос работал непрерывно, а рабочий газ подавался в камеру через регулируемый натекатель). Начальное соотношение концентраций рабочих газов и добавок варьировалось и контролировалось в ходе экспериментов. В динамическом режиме, вентилем на вакуумном насосе и натекателем на баллоне, можно было достигнуть динамического равновесия между скоростью откачки и величиной подачи газа, стабилизируя давление в камере на заданном уровне. Камера была снабжена рядом вакуумно-плотных переходников предназначенных для ввода в разрядную камеру центрального электрода, электрических вводов, датчиков, электрического зонда. На диаметрально противоположных сторонах стальной вакуумной камеры на полувысоте располагались оптические окна, которые позволяли положение и количество страт в газовом разряде. Было выявлено, что скорость натекания атмосферного воздуха в разрядную камеру при давлении 13 Па составляла 1.6·10-3 Па/с, что является приемлемым для дальнейших исследований

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Полый сферический электрод.

Проведены эксперименты по измерению вольтамперных характеристик (ВАХ) и радиального распределения плавающего потенциала плазмы в разряде с центральным электродом, состоящим из трех колец (внешним и внутренним диаметром 5 и 4 см, соответственно), имеющих один центр, плоскости которых перпендикулярны друг другу. Эксперименты проведены при положительном и отрицательном потенциале центрального электрода относительно заземленной вакуумной камеры в разряде аргона и этилового спирта при давлении от 5 до 26 Па. ВАХ разряда для положительного потенциала центрального электрода в разряде чистого аргона приведена на рис. 2.

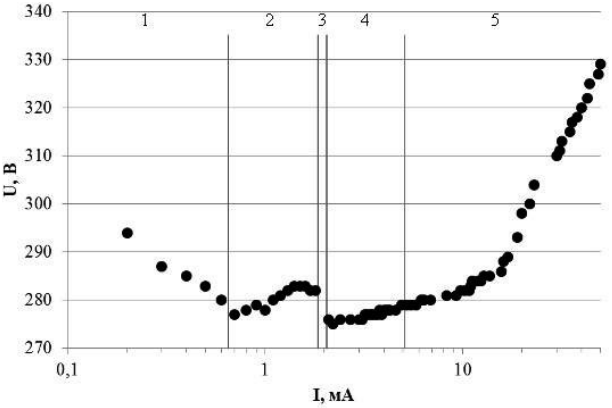

Рис.2 ВАХ положительного разряда с полым сферическим электродом в аргоне при давлении 13 Па. (1 – катодное свечение отсутствует; 2 - катодное свечение отсутствует, наблюдаются слабо светящиеся страты Таунсендовского разряда; 3 – разряд неустойчив; 4 – тлеющий разряд; 5 - анодное свечение).

При малых токах разряд соответствует Таунсендовскому режиму горения (1), в котором отсутствует катодное свечение, а в диапазоне токов (2) наблюдается стратификация разряда (см. фотографию, Рис. 3) – появляются сферически симметричные слабо светящиеся сферические оболочки с диффузными границами, ранее наблюдавшиеся разряде с анодом малого размера [43-44].

Внутри анода наблюдается свечение плазмы, полностью заполняющее его.

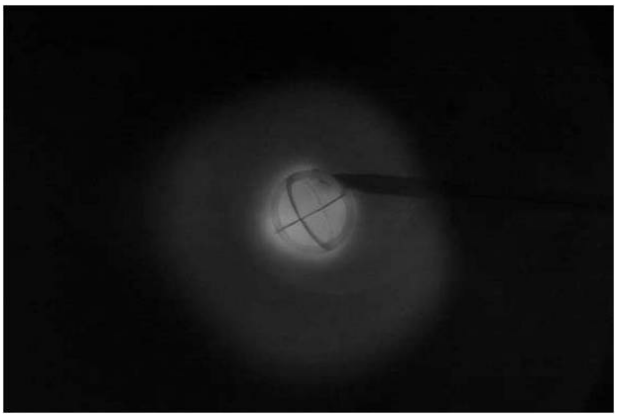

Рис.3 Фотография разряда в аргоне при токе 1,1 мА и напряжении 280 В и давлении 13 Па. В центре анод.

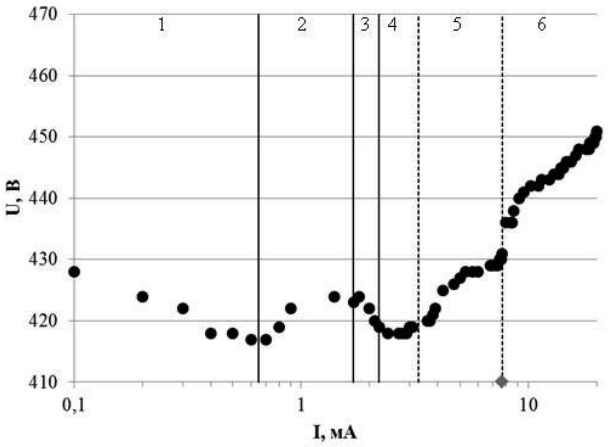

Рис.4 ВАХ положительного разряда с полым сферическим электродом в парах метилового спирта при давлении 13 Па. (1 – катодное свечение отсутствует; 2 - катодное свечение отсутствует, наблюдаются слабо светящиеся страты Таунсендовского разряда; 3 – разряд неустойчив; 4 – тлеющий разряд; 5- одна страта в тлеющем разряде; 6 – две страты в тлеющем разряде).

При переходе системы от Таунсендовского к тлеющему разряд теряет сферическую симметрию, возникает катодный слой, в сторону которого горит разряд, а стратификация ис-

чезает. При этом скачкообразно уменьшается общее напряжение разряда. При дальнейшем увеличении тока катодный слой распространяется на остальную часть катода, что характерно для нормального тлеющего разряда. При дальнейшем увеличении тока, пропадает внутренне свечение внутри анода.

В разряде в этиловом спирте наблюдается похожее поведение ВАХ (рис. 4), но при возникновении стратификации в тлеющем разряде при увеличении тока напряжение разряда скачкообразно увеличивается на величину порядка 10В, что связано с перераспределением объёмного заряда в плазме.

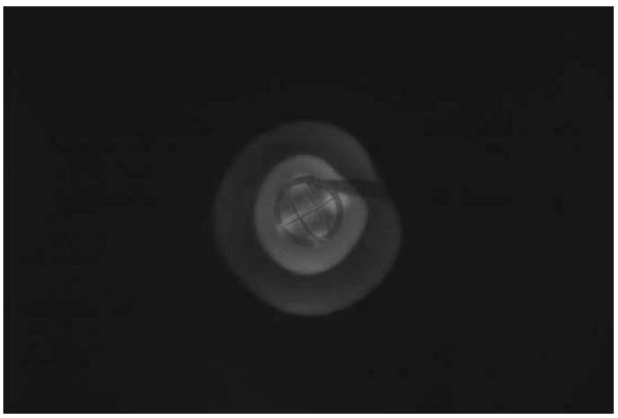

Рис.5 Фотография разряда в этиловом спирте при токе 10,3 мА и напряжении 442 В и давлении 13 Па. В центре анод.

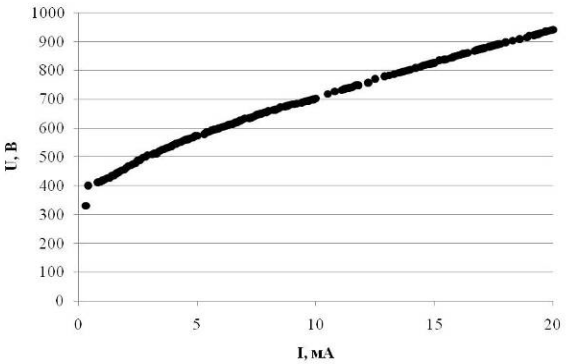

Рис.6 ВАХ отрицательного разряда с полым сферическим электродом в этиловом спирте при давлении 13 Па.

Фотографии стратификации разряда показаны на рис. 5.

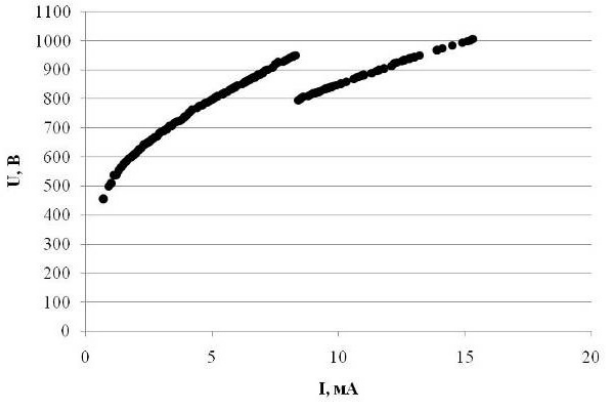

Рис.7 ВАХ отрицательного разряда с полым сферическим электродом в аргоне при давлении 5 Па.

Для отрицательной полярности поведение ВАХ разряда при давлении 13 Па (см. рис. 6 для метилового спирта) значительно отличается от случая анода в центре камеры – разряд горит в аномальном режиме, что связано с небольшой площадью катода.

При меньшем давлении было зарегистрировано другое поведение ВАХ (рис. 7).

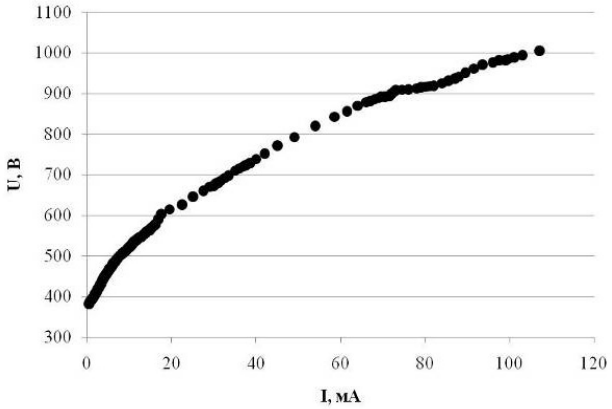

Рис.8 ВАХ отрицательного разряда с цельным металлическим сферическим электродом в этиловом спирте при давлении 13 Па.

Напряжение разряда в этом случае немонотонно увеличивалось по мере роста тока – при некотором значении резко падало, на величину примерно 100 В, а в центре электрода возникал плазменный шар, который увеличивался по мере увеличения тока. Зондовые измерения показали, что при возникновении плазменного шара плавающий

потенциал внутри электрода становится непостоянным.

Сферический электрод большого размера

В следующей серии экспериментов в центр металлической вакуумной камеры был помещен электрод 15 см в диаметре, увеличив таким образов на порядок его площадь по сравнению с предыдущими экспериментами [43-44]. ВАХ для отрицательного и положительного разряда показаны на рис. 8 и 9, соответственно.

Для разряда, катодом в котором служил цельный металлический шар, ВАХ соответствует аномальному тлеющему разряду. Для случая, когда металлический шар служил анодом, при токах более 7 мА, разряд горел в нормальном тлеющем режиме, а при возникновении страт напряжение разряда резко увеличивалось.

Было замечено, что появление страт возникало при большем токе разряда, по сравнению с разрядом с анодом меньшего размера. Например, при размере сферического анода 5 мм, страты возникали уже при токе примерно 3 мА [44], а в рассматриваемом случае появление первой страты наблюдалось при токе более 28 мА.

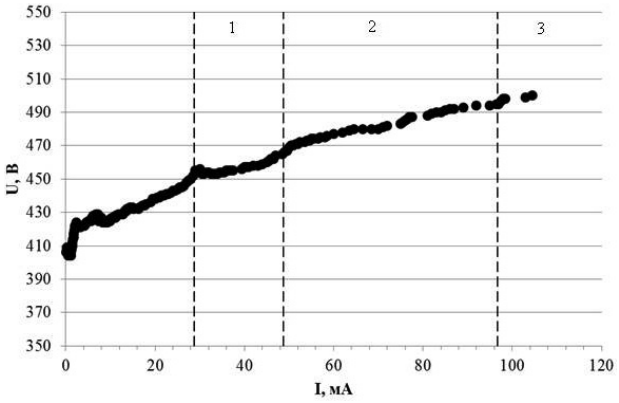

Рис.9 ВАХ положительного разряда с цельным металлическим сферическимэлектродом в этиловом спирте при давлении 13 Па.(1 - одна страта в тлеющем разряде; 2 – две страты в тлеющем разряде; 3 – три страты в тлеющем разряде).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены вольтамперные характеристики разряда при положительной и отрицательной полярности центрального электрода в среде аргона и парах этилового спирта. Использовались электроды двух видов: полый сферический электрод (размером 5 см) и цельный электрод большого размера (15 см в диаметре.) При положительном потенциале центрального электрода по мере увеличения тока разряд горел в нескольких режимах: Таунсендовском,стратифицированном таунсендовском и тлеющем разряде, который мог быть стратифицированным при добавлении паров спирта. При отрицательном потенциале центрального электрода и давлении 13 Па ВАХ характеристика соответствовала аномальному тлеющему разряду. При уменьшении давления до 5 Па, ВАХ имела немонотонный характер: при некотором значении резко падало, на величину примерно 100 В, а в центре электрода возникал плазменный шар, который увеличивался по мере увеличения тока. Зондовые измерения показали, что при возникновении плазменного шара плавающий потенциал внутри электрода становится непостоянным.

Также было обнаружено, что изменение размеров центрального электрода значительно меняло характеристики разряда – при увеличении диаметра стратификация в тлеющем разряде возникала при более высоких токах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Недоспасов А.В. Страты // УФН 1968. № 94. С. 439 – 462. Nedospasov A.V. Striations // Sov. Phys. Usp. 1968 Vol. 11. N. 2. P. 174 – 187.
2. Пекарек Л. Ионизационные волны (страты) в разрядной плазме // УФН 1968. № 94. . 463 500 Pekarek L. Ionization waves (striations) in a Discharge plasma // Sov. Phys. Usp. 1968. Vol. 11. P. 188 – 208.
3. Ланда П.С., Мискинова Н.А., Пономарев Ю.В. Ионизационные волны в низкотемпературной плазме // УФН 1980. № 132. С. 601 637.

© Сахапов С.З., Замчий А.О., Серебрякова М.А.

Landa P.S., Miskinova N.A., Ponomarev Yu.V. Ionization waves in low-temperature plasmas // Sov. Phys. Usp. 1980. Vol. 23. P. 813 – 834.
4. Райзер Ю.П., Физика газового разряда. Долгопрудный: Интеллект, 2009. Raiser Y.P. Gas Discharge Physics. Berlin: Springer-Verlag, 1991.
5. Yu. B. Golubovskii, V. A. Maiorov, V. O. Nekutchaev, J. Behnke, J. F. Behnke. Kinetic model of ionization waves in a positive column at intermediate pressures in inert gases // Physical Review E. 2001. Vol. 63. P. 63 – 72
6. Tsendin L.D. Electron Kinetics in Non-Uniform Glow Discharge Plasmas. // Plasma Sources Science and Technology 1995. V. 4. N. 2. P. 200 – 211
7. Golubovskii Yu.B., Maiorov V.A., Nekutchaev V.O., Behnke J., and. Behnke J.F. On the formation of electron velocity distribution functions in striation-like fields // Plasma Sources Sci. Technol. 2002. V. 11. N. 3. P. 309 – 316.
8. Kolobov V.I., Godyak V.A. Non-local electron kinetics in collisional plasmas // IEEE Trans. Plasma Sci., // Vol. 23 P. 503 – 531.
9. Sigeneger F., Winkler R. Spatial Relaxation of Electrons in Nonisothermal Plasmas. // Plasma Chemistry and Plasma Processing. 1997. Vol. 17. N. l. P. 1 – 19.
10. Нерушев О.А., Новопашин С.А., Радченко В.В., Сухинин Г.И.. Сферические страты в тлеющем разряде. // Письма в ЖЭТФ 1997. Т. 66. В. 11. С. 679 682. Nerushev O.A., Novopashin S.A., Radchenko V.V., Sukhinin G.I. Spherical striations in a glow discharge. // JETP Lett. 1997. Vol. 66. N. 11. P. 711 – 714.
11. Nerushev O.A., Novopashin S.A., Sukhinin G.I., Radchenko V.V. Spherical Stratification of Glow Discharge // Phys. Rev. E 1998. Vol. 58. N. 4. P. 4897 – 4902.
12. Belikov A.A., Novopashin S.A., Sakhapov S.Z. Two types of a spherical stratified gas discharge // Journal of Engineering Thermophysics – 2011 – Vol. 20. N. 2. – P. 187 – 191.
13. Belikov, A. E. Novopashin, S. A. Sakhapov, S. Z. Two Types of Three-Dimensional Stratified Gas Discharge // IEEE Trans. PlasmaSci. – Aug. 2011. – Vol. 39. – N. 11. – P. 2548 – 2549.