

РОЛЬ ДИФФУЗИИ В ФОРМИРОВАНИИ СТРАТИФИКАЦИИ ОБЪЕМНОГО ГАЗОВОГО РАЗРЯДА

Сахапов С. З., Смовж Д. В., Федосеев А. В., Баранов Е. А., Зайковский А. В.,
Замчий А. О., Серебрякова М. А., Калюжный Н. А., Костоград И. А.

Институт теплофизики СО РАН, Новосибирск, Россия (630090, Новосибирск, пр-т Лаврентьева, 1), e-mail: sakhapov@gmail.com

Сферические страты в объемном газовом разряде с малым анодом обнаружены сравнительно недавно и с тех пор интенсивно исследовались как в России, так и за рубежом. 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 статье представлены результаты экспериментальных исследований объемного газового разряда с различной полярностью на центральном электроде. Для стабильного горения разряда при отрицательной полярности центрального электрода его размер был увеличен на порядок. Использовался цельный металлический электрод – была использована вся поверхность электрода, а также полый сферический электрод, состоящий из нескольких металлических колец (сферическая сетка). Эксперименты показали, что страты образуются только при положительной полярности центрального электрода. Также обнаружено, что увеличение центрального электрода значительно меняло характеристики разряда – стратификация возникала при более высоких токах, чем в разряде с меньшим анодом.

Ключевые слова: газовый разряд, стратификация, двойные слои.

THE ROLE OF DIFFUSION IN THE FORMATION OF THE GAS VOLUME DISCHARGE STRATIFICATION

Sakhapov S. Z., Smovzh D. V., Fedoseev A. V., Baranov E. A., Zaikovskii A. V.,
Zamchiy A. O., Serebryakova M. A., Kalyuzhny N. A., Kostograd I. A.

Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia (630090, Novosibirsk, Lavrentiev Ave, 1), e-mail: sakhapov@gmail.com

Spherical striations in the volume gas discharge with a small anode relatively recently discovered and, since then, been extensively studied, both in Russia and abroad. Nevertheless, all of the experimental and theoretical studies have been conducted with a positive polarity of the central electrode. The present study aimed at investigating the spherical gas discharge, both in a positive and a negative potential on the central electrode. In paper results on experimental investigation of a volume gas discharge of different polarity at the central electrode are represented. For the stability of the discharge at the negative polarity of the central electrode its size was increased by an order. Used solid metal electrode - was used the entire surface of the electrode, and a hollow spherical electrode consisting of several metal rings (spherical grid). Experiments showed that the striations are formed only at the positive polarity of the central electrode. Also found that increasing the size of the central electrode discharge characteristics considerably changed notably stratification of the glow discharge occurs at higher currents.

Keywords: gas discharge, stratification, double layers.

Введение

Стратификация положительного столба газового разряда постоянного тока в трубках – известное и описанное явление. Основные характеристики таких разрядов хорошо изучены [1,2,5], и предложены несколько моделей для описания этого явления как в инертных, так и в молекулярных газах [5,7-9]. В работе [3] экспериментально зарегистрировано явление сферической стратификации в объемном тлеющем газовом разряде. 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, связанным со сферической стратификацией, что позволит понять физическую природу явления и найти области практического приложения полученных результатов. Публикации [3,10] 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.

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 [4]. 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 показали, 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).

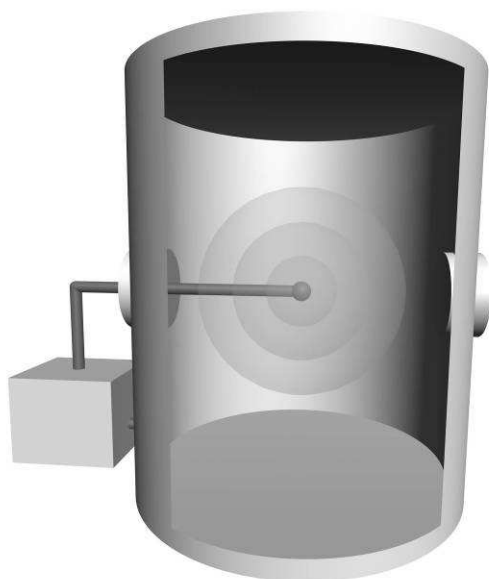


Рис. 1. Экспериментальная установка

В центр камеры помещался стальной электрод, имеющий форму шара диаметром 15 см, либо сетки диаметром 5 см. На центральный электрод подавалось положительное или отрицательное напряжение относительно земли. Для этого был подготовлен источник положительного и отрицательного напряжения постоянного тока мощностью до 600 Вт с максимальным напряжением 1 А. Перед проведением экспериментов камера обгаживалась 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. 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 полувывоте 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 $1.6 \cdot 10^{-3}$ 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(а).

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. 2(б)) – появляются сферически симметричные слабо светящиеся сферические оболочки с диффузными границами, ранее наблюдавшиеся в разряде с анодом малого размера [6]. Внутри анода наблюдается свечение плазмы, полностью заполняющее его. При переходе системы от таунсендовского к тлеющему разряд теряет сферическую симметрию, возникает катодный слой, в сторону которого горит разряд, а стратификация исчезает. 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 внутреннее свечение внутри анода.

В разряде в этиловом спирте наблюдается похожее поведение ВАХ (рис. 2(в)), 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. Фотографии стратификации разряда показаны на рис. 2(г).

Для отрицательной полярности поведение ВАХ разряда при давлении 13 Па (см. рис. 3(а) 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. 3(б)).

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.

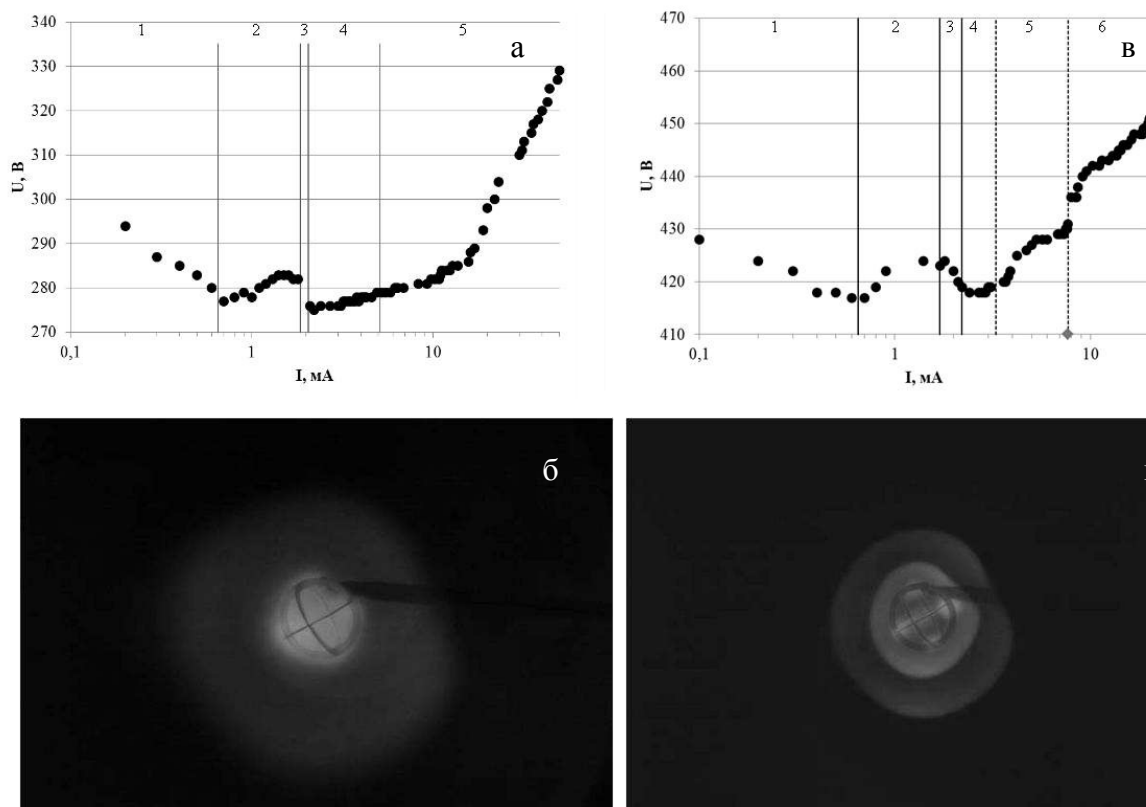


Рис. 2. а) ВАХ положительного разряда с полым сферическим электродом в аргоне при давлении 13 Па. (1 – катодное свечение отсутствует; 2 – катодное свечение отсутствует, наблюдаются слабо светящиеся страты таунсендовского разряда; 3 – разряд неустойчив; 4 – тлеющий разряд; 5 – анодное свечение); б) Фотография разряда в аргоне при токе 1,1 мА и напряжении 280 В и давлении 13 Па. В центре анод; в) 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); г) Фотография разряда в этиловом спирте при токе 10,3 мА и напряжении 442 В и давлении 13 Па. В центре анод.

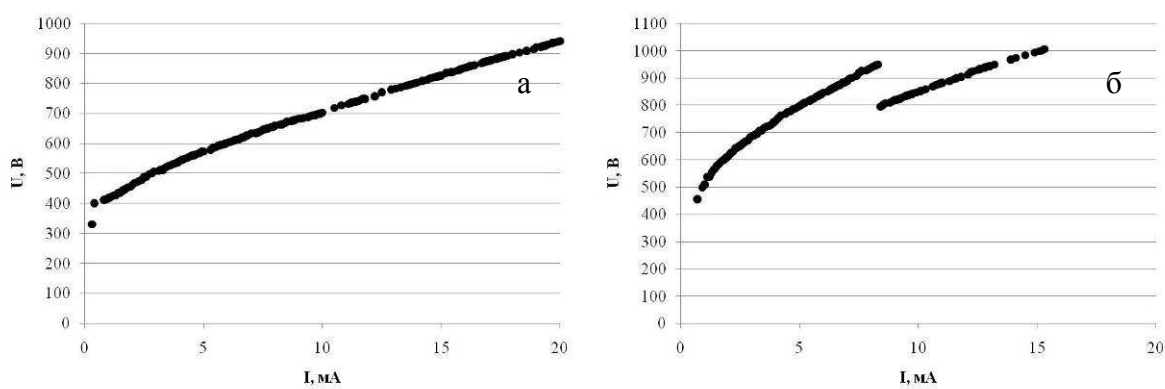


Рис. 3. ВАХ отрицательного разряда с полым сферическим электродом в этиловом спирте при давлении 13 Па (а) и в аргоне при давлении 5 Па (б)

Сферический электрод большого размера

В следующей серии экспериментов в центр металлической вакуумной камеры был помещен электрод 15 см в диаметре, увеличив таким образом на порядок его площадь по сравнению с предыдущими экспериментами [3,4,6,10]. ВАХ для отрицательного и положительного разряда показаны на рис. 4, (а) и (б), соответственно.

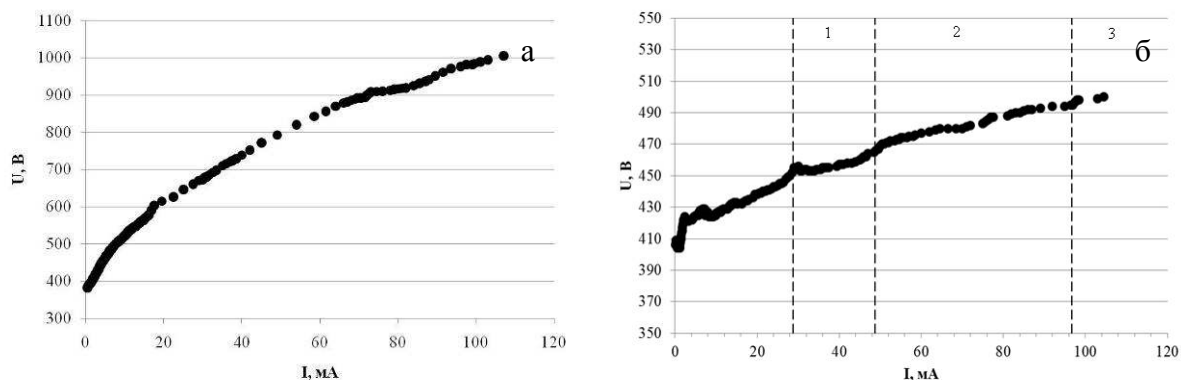


Рис. 4. ВАХ отрицательного разряда с цельным металлическим сферическим электродом в этиловом спирте при давлении 13 Па (а) и положительного разряда с цельным металлическим сферическим электродом (б) в этиловом спирте при давлении 13 Па. (1 – одна страта в тлеющем разряде; 2 – две страты в тлеющем разряде; 3 – три страты в тлеющем разряде)

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 [6], а в рассматриваемом случае появление первой страты наблюдалось при токе более 28 мА.

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 и цельный электрод большого размера. 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. Во всех экспериментах при отрицательном потенциале на центральном электроде сферическая стратификация не наблюдалась, что подтверждает предположение о существенной роли диффузии в образовании неустойчивости, приводящей к стратификации разряда.

Также было обнаружено, что увеличение центрального электрода значительно меняло характеристики разряда – стратификация возникала при более высоких токах, соответствующих появлению страт в разряде с малым анодом размерами больше размера электрода. Таким образом, можно предположить, что сферические страты являются дополнительным источником заряженных частиц, поступающих в объем разряда, которые в анодном слое образуются в недостаточном количестве, для поддержания разряда, вследствие малости центрального электрода.

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).

Список литературы

1. Ланда П. С., Мискинова Н. А., Пономарев Ю. В. Ионизационные волны в низкотемпературной плазме // УФН. – 1980. – № 132. – С. 601-637.
2. Недоспасов А. В. Страты // УФН. – 1968. – № 94. – С. 439-462.
3. Нерушев О. А. Сферические страты в тлеющем разряде. / Новопашин С. А., Радченко В. В., Сухинин Г. И. // Письма в ЖЭТФ. – 1997. – Т. 66, В. 11. – С. 679-682.
4. Нерушев О. А. Роль диффузионного тока в формировании сферических страт / Новопашин С. А., Радченко В. В., Сахапов С. З. // Письма в ЖТФ. – 2004. – Т. 30, В. 3. – С. 47-53.
5. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. – 3-е изд., перераб. и доп. — Долгопрудный: Интеллект, 2009. – 734 с
6. 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.
7. Golubovskii Yu. B. Kinetic model of ionization waves in a positive column at intermediate pressures in inert gases / Maiorov V. A., Nekutchayev V. O., Behnke J., Behnke J. F. // Physical Review E. – 2001. – Vol. 63. – P. 63-72.
8. Golubovskii Yu. B. On the formation of electron velocity distribution functions in striation-like fields / Maiorov V. A., Nekutchayev V. O., Behnke J., and Behnke J. F. // Plasma Sources Sci. Technol. – 2002. – V. 11, N. 3. – P. 309-316.

9. Kolobov V. I., Godyak V. A. Non-local electron kinetics in collisional plasmas // IEEE Trans. Plasma Sci. – 1995. – Vol. 23, N. 4. – P. 503-531.

10. Nerushev O. A., Spherical Stratification of Glow Discharge / Novopashin S. A., Sukhinin G. I., Radchenko V. V. // Phys. Rev. E. – 1998. – Vol. 58, N. 4. – P. 4897-4902.

Рецензенты:

Новопашин С. А., д-р физ.-мат. наук, зав. лабораторией, Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск.

Сухинин Г. И., д-р физ.-мат. наук, гл. н. с., Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск.