

03;04

Сферическая стратификация разряда в высокомолекулярных газах

© О.А. Нерушев, С.А. Новопашин, В.В. Радченко, Г.И. Сухинин

Институт теплофизики СО РАН, Новосибирск

Поступило в Редакцию 2 августа 2000 г.

Экспериментально показано, что сферическая стратификация возникает в газовых средах, содержащих высокомолекулярные добавки. Обнаружено, что в процессе разряда происходит диссоциативный распад молекул высокомолекулярной добавки, что приводит к деградации страт.

Стратификация или расслоение положительного столба "линейного" газового разряда (пример — разряд в трубках) — хорошо известное явление. Такая неустойчивость наблюдается в атомарных и молекулярных средах, а страты могут быть как бегущие, так и неподвижные [1]. В работе [2] зарегистрирована сферическая стратификация газового разряда низкого давления, когда вокруг небольшого положительно заряженного центрального электрода могут возникать стабильные неподвижные сферические пространственно вложенные друг в друга светящиеся оболочки. В отличие от страт в трубках в сферическом разряде наблюдались только неподвижные страты, причем разряд переходит в стратифицированный режим в газовых средах определенного химического состава. Настоящая работа посвящена исследованию формирования сферических страт в самостоятельном газовом разряде в различных газовых средах.

Эксперименты проводились в стальной цилиндрической вакуумной камере 60 см высотой и 50 см в диаметре. В центре камеры располагался стальной шарик радиусом 0.5 см, на который через балластное сопротивление величиной 24 к Ω от высоковольтного источника питания могло подаваться положительное напряжение $U_0 = 0 \div 2000$ В. Заземленные стенки камеры выполняли функцию второго электрода — катода. Перед началом эксперимента камера откачивалась до остаточного давления ~ 1 Па, а затем заполнялась рабочим газом. Из специального объема к основному газу могли добавляться пары высокомолекулярных веществ. Давление в камере контролировалось

мембранным датчиком давления. Основные эксперименты проводились при давлениях $p = 10 \div 50$ Па как в чистых атомарных (He, Ar, Kr) и низкомолекулярных (воздух, N₂, CO₂) газах, так и в смесях, содержащих добавки, такие как пары ацетона (C₃H₆O), этилового спирта (C₂H₅OH), диметил формамида (C₂H₇ON), бензола (C₆H₆).

Камера была оснащена прозрачными окнами для визуального наблюдения, фотографирования разряда и регистрации спектров излучения плазмы разряда в видимом диапазоне длин волн $\lambda = 360 \div 660$ nm.

Разряд зажигался путем подачи на центральный электрод положительного постоянного напряжения по величине выше пробойного. После возникновения разряда между центральным электродом и стенками камеры устанавливалась характерная разность потенциалов $U_d = 500$ V, которая в широком диапазоне разрядного тока $J_d = 5 \div 80$ mA практически оставалась постоянной. Ток разряда изменялся путем изменения напряжения U_0 источника питания.

В зависимости от химического состава газовой среды, давления и величины протекающего тока разряд мог стратифицироваться. В экспериментах наблюдалось от одной до более десятка страт. В исследованном диапазоне давлений и токов в чистых инертных газах страты не возникали. В перечисленных выше низкомолекулярных газах могло происходить расслоение положительного "столба" разряда, однако границы страт были сильно размытые и нестационарные. Неподвижные страты с резко выраженной границей наблюдались только после того, как в газовую среду добавлялись пары одной из перечисленных выше молекулярных добавок. Основные эксперименты проводились в смеси азота с ацетоном.

Количество страт и их размеры зависят от концентрации добавки ξ , полного давления p и тока разряда J . Увеличение начальной доли добавки приводит к увеличению количества страт и уменьшению относительного радиуса соседних страт. При этом область, занятая стратами, расширяется. Изменение давления приводит к изменению размера страт так, что при уменьшении давления p их радиус увеличивается обратно пропорционально p . Уменьшение величины тока приводит к уменьшению радиуса и количества страт вплоть до полного их исчезновения при некотором критическом значении тока J_c , значение которого близко к току потухания разряда. Для смеси азота с ацетоном при $p = 25$ Па и $\xi \approx 25\%$ J_c составило величину ~ 5 mA. Также было обнаружено, что радиус R_e внешней от центрального электрода страты уменьшается

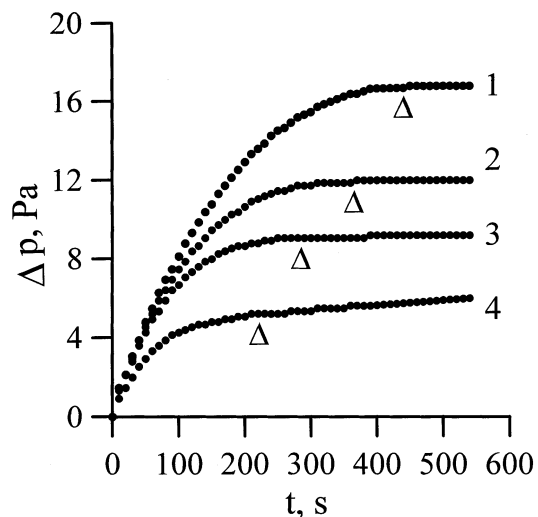


Рис. 1. Изменение давления $\Delta p = p - p_0$ в разрядной камере со временем t для различных концентраций ξ ацетона в азоте для $p_0 = 15$ Па: 1 — $\xi = 66\%$; 2 — $\xi = 49\%$; 3 — $\xi = 41\%$; 4 — $\xi = 24\%$. Символ Δ на графиках — момент исчезновения страт.

в зависимости от величины тока разряда как $J_d^{1/2}$, откуда следует, что с изменением J_d на поверхности внешней страты плотность тока $j_e = J_d/4\pi R_e^2 = \text{const}$. Для той же смеси при $p = 25$ Па и $\xi \approx 50\%$ в широком диапазоне тока $J_d = 5 \div 60$ mA плотность тока j_e оставалась постоянной и составляла величину $j_e \approx 4 \cdot 10^{-5}$ A/cm².

В смесях, содержащих добавки, был зарегистрирован монотонный со временем рост давления от начального значения p_0 до некоторой предельной величины p_f так, что изменение давления $\Delta p_f = p_f - p_0$ оказалось пропорциональным начальной концентрации высокомолекулярной компоненты (рис. 1). Оценки показывают, что благодаря уходу тепла на стенки камеры джоулев нагрев газа не может обеспечить подобный рост давления. Очевидно, увеличение давления в камере связано с диссоциативным развалом молекул добавки в результате плазмохимических процессов. На рис. 2 представлена зависимость относительного изменения давления p_f/p_0 от концентрации ацетона ξ

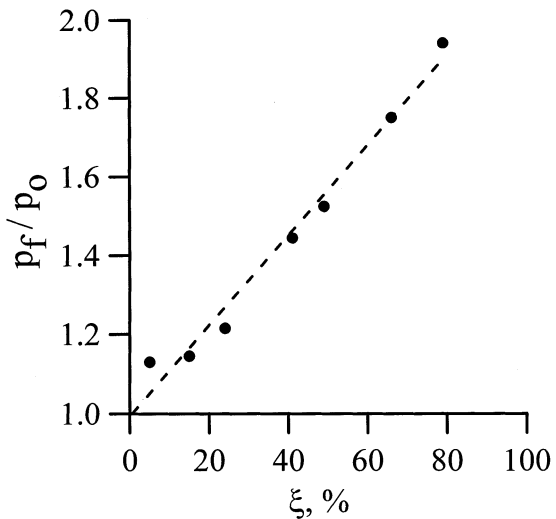


Рис. 2. Зависимость относительного изменения давления p_f/p_0 от начальной концентрации ацетона ξ в азоте при $t = 500$ s. Начальное давление $p_0 = 15$ Pa, разрядный ток $J = 30$ mA. Пунктирная линия — линейная аппроксимация экспериментальных точек.

в азоте, из которой видно, что в результате диссоциации молекулы ацетона распадаются преимущественно на две части. По мере диссоциации наблюдалось уменьшение количества страт вплоть до полного их исчезновения. Момент прекращения стратификации разряда помечен на рис. 2 символом Δ . Одновременно с ростом давления было зарегистрировано изменение спектра излучения из области разряда. На рис. 3, *a* и *b* представлены спектры интегрального излучения в различные моменты времени. Из рис. 3, *a* видно, что в первоначальный момент основными компонентами спектра являются полосы колебательных переходов молекул N_2 — первой и второй положительных систем (переходы: $V^3\Pi_g - A^3\Sigma_u^+$ и $C^3\Pi_u - V^3\Pi_g$ соответственно), а также первой отрицательной системы ионов N_2^+ (переход: $V^2\Sigma_u^+ - X^2\Sigma_g^+$). По истечении времени $t \sim 500$ s (время соответствует моменту, когда давление в камере выходит на плато) спектр излучения существенно изменился (рис. 3, *b*) — азотные полосы размазались и появились

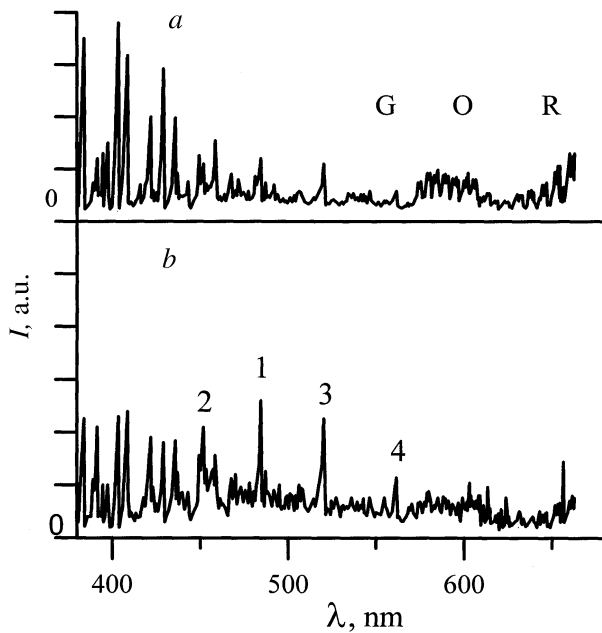


Рис. 3. Спектры излучения из области разряда в смеси азота с ацетоном в различные моменты времени: $a - t \approx 0$ s; $b - t \approx 600$ s. Начальное давление $p_0 = 15$ Pa, разрядный ток $J = 30$ mA. Цифрами обозначены спектральные линии излучения окиси углерода: 1 — $\lambda = 483.6$ nm; 2 — $\lambda = 451.1$ nm; 3 — $\lambda = 561.0$ nm; 4 — $\lambda = 608.0$ nm. Начальное давление $p_0 = 15$ Pa, разрядный ток $J = 30$ mA.

спектральные полосы, соответствующие системе Ангстрема излучения окиси углерода (переходы: $B^1\Sigma^+ - A^1\Pi$), которая изначально в газовой среде отсутствовала. Сопоставляя этот результат с барометрическими экспериментами, можно предположить, что окись углерода образовалась в результате диссоциативного отрыва группы CO от молекулы ацетона под действием электронного удара. Это подтверждает и тот факт, что на представленном временном интервале характер роста интенсивностей спектральных линий CO со временем аналогичен поведению давления в камере (рис. 4).

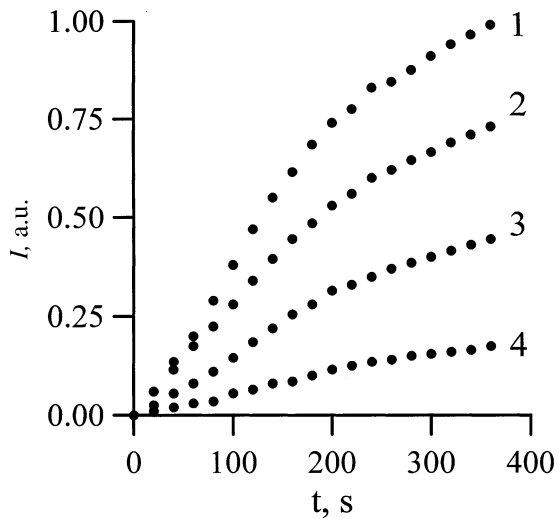


Рис. 4. Изменение интенсивности спектральных линий различных длин волн λ , соответствующих излучению окиси углерода, со временем t : 1 — $\lambda = 483.6$ nm; 2 — $\lambda = 451.1$ nm; 3 — $\lambda = 561.0$ nm; 4 — $\lambda = 608.0$ nm. Начальное давление смеси азот + ацетон $p_0 = 15$ Pa, разрядный ток $J = 30$ mA, $\xi \approx 50\%$.

Из представленных выше результатов можно заключить, что наличие высокомолекулярных добавок является необходимым условием возникновения устойчивых сферических страт, а отсутствие или разложение добавок, в данном случае — диссоциативный распад под действием электронного удара, приводит к отсутствию либо деградации страт. В экспериментах с протоком газа, когда часть газовой среды из разрядного промежутка откачивалась, а через регулируемый натекагель подавалось эквивалентное количество свежей смеси азота с ацетоном, устойчивая стратификация разряда наблюдалась сколь угодно долго, что подтверждает сделанный выше вывод.

Очевидно, что кинетика электронов в газах, содержащих высокомолекулярные добавки, существенно отличается от кинетики в низкомолекулярных средах. Среди наиболее важных процессов, которые влияют на транспортные характеристики движения электронов в первом случае, можно назвать следующие: диссоциативная рекомбинация, прилипание

электронов, широкий спектр энергетических потерь, многоступенчатые процессы и т.д. Все эти процессы могут приводить к существенному изменению макроскопических параметров плазмы таких, как, например, подвижность электронов и их температура. Вопрос о том, какой из вышеперечисленных процессов является определяющим в образовании сферических страт, остается открытым и требует дополнительных исследований.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта № 00–03–32428 Российского фонда фундаментальных исследований, гранта № 274 Федеральной целевой программы интеграции высшего образования и фундаментальной науки и гранта МНТЦ № 1425.

Список литературы

- [1] *Ланда П.С., Максимова Н.А., Пономарев Ю.В.* // УФН. 1980. Т. 3. С. 601–637.
- [2] *Нерушев О.А.* и др. // Письма в ЖЭТФ. 1997. Т. 66. В. 11. С. 679–682.