

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПОПЕРЕЧНОГО СТАЦИОНАРНОГО ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА В ГАЗОВОМ ПОТОКЕ

*В. С. Сербезов, С. Г. Ганчев, Н. И. Добринска*

Основной проблемой при использовании мощных быстропотоčných электроразрядных  $\text{CO}_2$  лазеров является поддержание устойчивого объемного тлеющего разряда. Согласно [1], конвективный механизм стабилизации разряда эффективен, если обеспечивает время прохождения газовой смеси через активную зону, меньшее, чем время, необходимое для развития тепловых неустойчивостей. Так как характерные времена процессов, связанных с индуцированием и развитием неустойчивостей, охватывают широкий диапазон от  $10^{-10}$  до  $10^{-2}$  с [2], то целесообразно для повышения устойчивости разряда в данных условиях целенаправленно воздействовать на пространственные характеристики плазменных неустойчивостей: место образования, линейные размеры, направление и скорость развития.

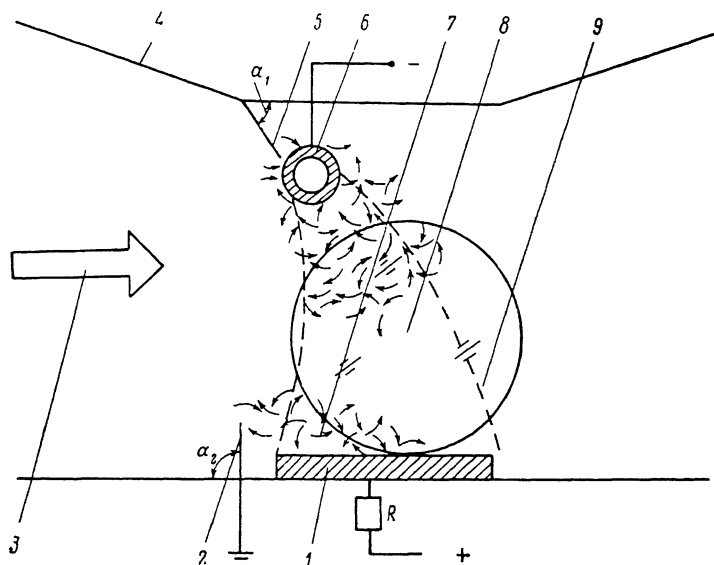


Рис. 1. Схема газоразрядной камеры и турбулизирующего комплекса.

1 — секционированный анод, 2 — анодный турбулизатор, 3 — газовой поток, 4 — конфузор, 5 — пластинчатый электрод, 6 — катод, 7 — зона повышенной турбулентности, 8 — резонатор, 9 — зона разряда, R — балластные сопротивления.

В [3-5] исследована возможность воздействия на устойчивость объемного тлеющего разряда посредством изменения газодинамических параметров газового потока.

Целью настоящей работы являются исследование и создание условий для поддержания устойчивого стационарного тлеющего разряда при повышенных значениях энерговклада  $\langle jE \rangle$  и рабочего давления газовой смеси  $p$  с помощью оптимизации параметров газового потока, а именно профиля и пространственных пульсаций скорости, турбулентной структуры газового потока в сочетании с использованием простого и эффективного метода предопределения.

Создание инверсной населенности в газовой смеси  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ , He, циркулирующей по замкнутому контуру, обычно достигается с помощью тлеющего разряда постоянного тока. Для устранения неустойчивостей в разряде часто используют конструкцию с размещением цилиндрического катода и сегментного анода в поперечном газовом потоке так, что векторы напряженности электрического поля E, скорости газового потока V и оптическая ось взаимно ортогональны. Секционирование анода обеспечивает однородность плотности тока, предотвращающую развитие ионизационных неустойчивостей. Эти принципы использовались и в настоящей работе.

Эксперименты проводились в газоразрядной камере с турбулизирующим комплексом, схема которой показана на рис. 1. В описываемой системе с активным объемом  $V=3864 \text{ см}^3$

и скоростью газового потока  $v=30 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$  устойчивый поперечный разряд поддерживался в отсутствие турбулизирующего комплекса при максимальном энергокладе  $\langle jE \rangle_{\text{max}} = 9.6 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-3}$  и максимальном рабочем давлении оптимальной смеси  $p_{\text{max}} = 40 \text{ Тор}$  (рис. 2).

Турбулизирующий комплекс состоит из двух пластин. Первая представляет собой вращающийся медный электрод с такими размерами: высота  $h_1 = 26 \text{ мм}$ , ширина  $d_1 = 0.5 \text{ мм}$  и длина  $l_1$  равна длине цилиндрического катода. Электрод закреплен на краю конфузора параллельно продольной оси катода на расстоянии  $a_1 = 2 \text{ мм}$  от последнего при угле  $\alpha_1 = 45^\circ$ .

На расстоянии  $a_2 = 20 \text{ мм}$  перед секционированным анодом поперечно газовому потоку ( $\alpha_2 = 90^\circ$ ) поставлена вторая металлическая пластина с размерами  $h_2 = 5 \text{ мм}$ ,  $d_2 = 0.5 \text{ мм}$  и  $l_2$  равна длине анода. Пластина в отличие от пластинчатого электрода связана с питающей системой. Линейные размеры пластин и значения углов  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  подобраны экспериментально.

С целью исследования зависимости энергоклада  $\langle jE \rangle$  от рабочего давления  $p$  при различных значениях угла  $\alpha_1$  был проведен ряд экспериментов, результаты которых представлены на рис. 2. При устойчивом разряде максимальные значения  $\langle jE \rangle_{\text{max}}$  и  $p_{\text{max}}$  достигаются при значении угла  $\alpha_1 = 45^\circ$ .

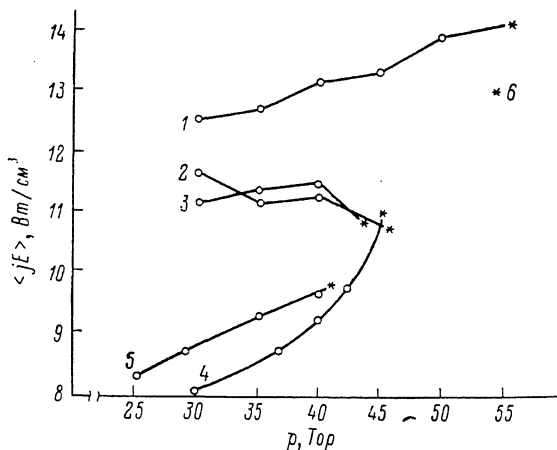


Рис. 2. Зависимость энергоклада  $\langle jE \rangle$  от рабочего давления  $p$  для различных значений  $\alpha_1$ . В случае пластинчатого электрода 1 — 45, 2 — 60, 3 — 30°; в случае диэлектрической пластины 4 — 45°; 5 — при отсутствии турбулизирующего комплекса; 6 — появление дуги.

Характерная зависимость самостоятельного разряда  $\langle jE \rangle \sim p$  [6], получаемая при оптимальных значениях углов  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ , показывает, что турбулизирующий комплекс влияет и на кинетику процессов возбуждения и уничтожения заряженных частиц. При давлении  $p < 10 \text{ Тор}$  и расстоянии  $a_1 = 1-4 \text{ мм}$  наблюдается появление коронного разряда между краями пластинчатого электрода и катодом. Для исследования этого процесса была снята вольт-амперная характеристика, свойственная самоподдерживающемуся темному разряду таусендовского типа [7].

Замена пластинчатого электрода на диэлектрическую пластину с такими же размерами и при тех же условиях (рис. 2) дает более низкие результаты.

Влияние турбулизирующего комплекса на устойчивость разряда при энергокладах  $\langle jE \rangle > 9.6 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-3}$  и давлениях  $p > 40 \text{ Тор}$  объясняется совместным действием двух факторов: образованием турбулентных вихрей и поддержанием разряда таусендовского типа.

Тепловая неустойчивость влияет на ограничение энергоклада. Из-за специфики горения самостоятельного тлеющего разряда тепловая неустойчивость наблюдается в пространстве около электродов [8].

Турбулизирующий комплекс, расположенный непосредственно у катода и анода при оптимальных значениях углов  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ , способствует улучшению профиля скорости газового потока. Это уменьшает температурный градиент в приэлектродной области разряда и его склонность к образованию тепловых неустойчивостей.

Возникновение переходного режима и турбулентности в ламинарном потоке (в данном случае число Рейнольдса  $Re \approx 2150$ ) при относительно коротких каналах зависит от возмущений, наблюдающихся у входа каналов [9]. Создание турбулентно-плотных вихрей перед анодом и катодом и их перемещение в зону разряда влияют на структуру последнего.

Поворот пластинчатого электрода на угол  $\alpha_1$  позволяет изменять геометрию конфузора. Потoki заряженных частиц, увлекаемые турбулентными вихрями, эффективно выполняют

роль предыонизаторов. Влияние угла  $\alpha_1$  на зависимость  $\langle jE \rangle \sim p$  объясняется созданием турбулентных вихрей с другими значениями интенсивности  $\varepsilon$ , масштаба турбулентности  $L$  и частоты пульсаций  $n$  и изменением их направления к различным областям тлеющего разряда. Наиболее чувствительны к внешнему влиянию области отрицательного свечения и темного фарадеева пространства (ТФП). При угле  $\alpha_1=45^\circ$  потоки заряженных частиц стабилизируют область отрицательного свечения. Наблюдаемое увеличение активной катодной площади и сжатие области ТФП приводит к перераспределению напряженности электрического поля, которое противодействует выносу заряженных частиц газовым потоком.

Количественная разница в зависимостях  $\langle jE \rangle$  от  $p$  для случаев пластинчатого электрода и диэлектрической пластины при угле  $\alpha_1=45^\circ$  объясняется различием в кинетике процессов создания и уничтожения заряженных частиц. Возникновение самоподдерживающегося темного разряда влияет на скорость размножения электронов в области отрицательного катодного свечения.

В пограничном слое над секционированным анодом, где расположены области анодного падения напряжения и часть положительного столба, возникновение переходного режима наряду со значением числа Рейнольдса и возмущениями на входе в большой степени зависит от шероховатости поверхности канала. Турбулизирующая пластина, поставленная на краю конфузора на расстоянии  $a_2$  от анодного блока, создает турбулентные вихри, переносимые потоком в область над анодом. Турбулентные вихри противодействуют флуктуациям плотности газовой смеси, вызванным процессами в пограничном слое.

При оптимальном размещении турбулизирующего комплекса поддерживается устойчивый тлеющий разряд с максимальным энерговыделением  $\langle jE \rangle_{\max}=14.2 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-3}$  и максимальным рабочим давлением  $p_{\max}=55 \text{ Тор}$ . При дальнейшем повышении  $\langle jE \rangle$  и  $p$  с течением времени в разряде наблюдается склонность канала к контракции и появлению дуг. Это связано с перегревом и отравлением смеси в результате плазмохимических реакций.

Таким образом, впервые показано, что использование самоподдерживающегося разряда таусендовского типа и оптимизация газодинамических параметров потока дают возможность стабилизировать поперечный тлеющий разряд в быстропоточном непрерывном  $\text{CO}_2$  лазере. Устойчивый разряд поддерживается при максимальном энерговыделении  $\langle jE \rangle_{\max}=14.2 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-3}$  и максимальном рабочем давлении оптимальной смеси  $p_{\max}=55 \text{ Тор}$ , т. е. в результате проведенных экспериментов энерговыделитель был увеличен в 1.5 раза, а рабочее давление в 1.3 раза.

Исследования показывают необходимость целенаправленного влияния на пространственные характеристики плазменных неустойчивостей для каждого конкретного типа конструкции газоразрядной камеры с электродным комплексом.

### Список литературы

- [1] Смит К., Томсон Р. Численное моделирование газовых лазеров. М.: Мир, 1981. 505 с.
- [2] Haas R. A. // Phys. Rev. 1973. Vol. A8. P. 1017—1023.
- [3] Eckbret A. C., Owen F. S. // Rev. Sci. Instr. 1972. Vol. 43. N 7. P. 995—998.
- [4] Wiegand W. J., Nighan W. L. // Appl. Phys. Lett. 1975. Vol. 26. N 10. P. 554—556.
- [5] Бондаренко А. В., Голубев В. С., Данышиков Е. В. и др. // Физика плазмы. 1979. Т. 5. № 3. С. 687—692.
- [6] Велихов Е. П., Письменный В. Д., Рахимов А. Т. // УФН. 1977. Т. 122. № 3. С. 419—445.
- [7] Грановский В. Д. Электрический ток в газе. М.: Наука, 1971. 545 с.
- [8] Бекефи Дж. Плазма в лазерах. М.: Энергоиздат, 1982. 404 с.
- [9] Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1969. 742 с.

Институт прикладной физики  
Болгарской АН

Поступило в Редакцию  
24 января 1989 г.