

УДК 537.521.621.6

В.Т.Волов, Х.Д.Ламажапов, А.Д.Марголин, А.В.Мищенко,
В.М.Шевелев

ТЕОРИЯ ВИХРЕВОГО ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА И ПУТИ СОЗДАНИЯ
НА ЕГО ОСНОВЕ ВИХРЕВОГО CO_2 -ЛАЗЕРА

Принятые обозначения: E - напряженность электрического поля на оси разряда, В/м; N - плотность нейтральных частиц, $1/\text{м}^3$; T_e - электронная температура, эВ; q - плотность теплового потока, $\text{Вт}/\text{м}^2$; W_s , W , W_c - усредненная по объему, текущая и критическая плотности мощности соответственно, $\text{Вт}/\text{м}^3$; n , K - показатели политроны и адиабаты соответственно.

В настоящее время имеется значительное количество работ, посвященных различным аспектам использования вихревых труб в различных областях науки и техники. Новым применением самовакуумирующейся вихревой трубы (СВТ), разработанной А.П.Мержуловым [1], является использование ее в качестве основы для создания нового типа электроразрядных газовых лазеров - вихревого CO_2 -лазера.

Исследование тлеющего разряда в вихревой камере [2] показало возможность достижения больших удельных вкладов электрической мощности, что обусловлено рекордными значениями турбулентной диффузии в вихре [3]. Данное обстоятельство побудило авторов к дальнейшему теоретическому исследованию вихревого тлеющего разряда с целью использования его для накачки CO_2 -лазера. Для расчета термодинамических параметров в сильно закрученном сжимаемом потоке в первом приближении использовалась методика, разработанная в работе [4], а диффузия электронов в вихревом тлеющем разряде рассчитывалась в приближении квазинейтральной плазмы по уравнениям, полученным в работах [5,6] для осесимметричного ($\partial/\partial\varphi = 0$), стационарного случая ($\partial/\partial t = 0$), а также с учетом зависимости коэффициента турбулентной диффузии от радиуса [3,5]. Данное приближение дает хорошее качественное и количественное согласие с экспериментом по интегральным характеристикам (W_s , n_e , ρ , T_e , E/N). Для рас-

чета локальных значений термодинамических и энергетических характеристик (T , W) в случае больших удельных энерговыделов использовалось уравнение энергии с учетом квазизобаричности процесса ($\partial p / \partial r = 0$).

При теоретическом анализе показано, что существуют два качественно различных режима вихревого тлеющего разряда: для фиксированного расхода газа и малых удельных вкладов мощности в разряд ($W < W_*$), логарифмические градиенты электронных и газовых температур приблизительно равны друг другу и направлены в противоположные стороны, в случае больших удельных вкладов мощности логарифмические градиенты газовых и электронных температур направлены в одну сторону - от периферии к центру разряда ($W > W_*$) при этом расчетное значение коэффициента политропы существенно переменено по радиусу разряда и изменяется в пределах $0 < n \leq K$.

Были проведены эксперименты с целью определения удельных энерговыделов в вихревой тлеющий разряд и снятия вольт-амперных характеристик. Опыты производились на вихревой трубе, имеющей следующие габариты: $d_{BK} = 55 \cdot 10^{-5}$ м - диаметр вихревой камеры; $F_c = 0,13$ - относительная площадь соплового ввода; $L = L/d_{BK}$ - относительная длина вихревой камеры. В центре внешних щек диффузора установлены кольцевые электроды с внутренним диаметром $d_3 = 15 \cdot 10^{-3}$ м, расстояние между электродами варьировалось. Устройство работало в квазистационарном режиме: рабочий газ под давлением $(3...5) \cdot 10^5$ Па подавался через тангенциальный сопловый ввод и истекал в вихревую камеру, где в присоединенной области трубки возникала область низкого давления ($P = 100...200$ Торр) и температуры (150...200 К). На электроды трубки подавалось переменное напряжение (27 кВ, 50 Гц) от высоковольтного трансформатора через регулируемое балластное сопротивление (10-300 Ом). В момент достижения минимального давления в присоединенной области происходила пробой межэлектродного промежутка и зажигался вихревой тлеющий разряд. Он заполнял присоединенную область низкого давления, которая составляла 0,3...0,5 диаметра трубки. За каждый полупериод переменного тока разряд проходил три фазы: пробой, горение и погасание. Опыты проводились на CO_2 , N_2 , He и Ar, а также на их смесях. В стадии горения вихревого тлеющего разряда вольт-амперная характеристика носила нейтральный характер, т.е. напряжение горения разряда практически не изменялось при изменении силы тока от нуля до максимального значения I_a . Средние плотности мощности, вложенные в разряд в вихревой камере, составляют $W_5 = 200$ Вт/см³. Фотосъемка разряда с помощью фоторегистратора показа-

ла, что разряд носил однородный характер по объему, и перегревных неустойчивостей не возникало. При использовании в качестве рабочего газа смеси $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He} = 1:11:111$ была зарегистрирована генерация индуцированного излучения $W_{03} \approx 1$ Вт при длине резонатора

$$l = 13 \cdot 10^{-2} \text{ м с алюминированными зеркалами с коэффициентом отражения } 0,9.$$

Сам факт генерации лазерного излучения при высокой удельной мощности, вложенной в разряд (до 200 Вт/см^3), говорит о том, что разряд в трубке был тлеющим и среда не перегревалась. По известным геометрическим ($F_c, D_{\text{гуп}}, \Delta g, R_{\text{гуп}}, \bar{L}, d_3$) и режимным параметрам ($P_c^*, P_H, \text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He}, J_{\text{ср}}$) с использованием данных [6] рассчитывались теоретические зависимости распределений электронных и газовых температур по радиусу вихревого тлеющего разряда и вольт-амперные характеристики. Сопоставление теоретических и экспериментальных значений вольт-амперных характеристик показало их удовлетворительное согласование.

Таким образом, проведенное исследование показало возможность использования вихревого тлеющего разряда для возбуждения рабочей среды CO_2 -лазеров.

Библиографический список

1. Меркулов А.П. Совместная работа вихревой трубы и диффузора // Холодильная техника. 1962. № 4.
2. Шмелев В.М., Марголин А.Д. К теории вихревого тлеющего разряда // ЖТЭ. 1980. Т.50. С.745-748.
3. Меркулов А.П., Кудрявцев В.М., Шахов В.Г. Определение турбулентных касательных напряжений на основе замеров осредненного течения в вихревой камере //Тр. II Всесоюз. конф. "Вихревой эффект и его применение в технике". Куйбышев, 1976. С.96-112.
4. Волов В.Т. Метод расчета вихревого диффузорного устройства //ИФЖ. 1983. № I. С.35-41.
5. Волов В.Т., Ламажапов Х.Д. К теории тлеющего разряда в вихревой камере. М.:ВИНИТИ, 1986. № 3522-В87.
6. Волов В.Т. Теория вихревого электроарядного CO_2 -лазера. М.:ВИНИТИ. 1987. № I645-В87.