

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА НЕПРЕРЫВНЫХ СО₂-ЛАЗЕРОВ С ДИФФУЗИОННЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

Введение

Из всех существующих лазеров для применения в промышленности наиболее востребованными являются электроразрядные СО₂ – лазеры [1 – 4]. Сегодня создаются не только новые конструкции и модели СО₂-лазеров с различными выходными параметрами, но также проводится значительное количество исследований по оптимизации лазерных характеристик, т.е. исследований по определению условий, при которых достигаются предельные значения мощности, наилучшая стабильность, расходимость пучка, модовая структура, форма импульса, спектральная чистота и т.д. Оптимизация характеристик лазера представляет собой совокупность фундаментальных математических решений и численных методов, ориентированных на нахождение и идентификацию наилучших вариантов параметров из множества альтернатив, позволяющих избежать полного перебора и оценивания возможных вариантов [5 – 8].

Следует отметить, что остается необходимость в оптимизации СО₂-лазеров, которые широко используются в промышленности, для повышения энергетических характеристик [9].

Математическая модель динамики химического состава газовой смеси СО₂ лазера

Метод расчета динамики химического состава основан на различии двух временных масштабов: медленного ($\sim 10^2$ с), связанного с необратимыми изменениями химического состава в дополнительном объеме, и быстрого ($\sim 10^{-2}$ с), связанного с процессами диссоциации, рекомбинации и диффузии частиц. Для описания изменения химического состава используются стационарные уравнения диффузии, следующие из уравнений баланса и движения частиц сорта α в диффузионном режиме:

$$\nabla \cdot D_{\alpha} \nabla n_{\alpha} + I_{\alpha} = 0, \quad (1)$$

где D_{α} и n_{α} – коэффициент диффузии и концентрация α -компоненты; I_{α} – плотность источников частиц данного сорта, образующихся и гибнущих в результате химических реакций. Уравнение (1) должно быть дополнено граничными условиями, отражающими образование и гибель частиц на стенках разрядного канала:

$$\vec{e} D_{\alpha} \nabla n_{\alpha} = S_{\alpha}, \quad (2)$$

где S_{α} – поверхностная плотность источников частиц сорта α ; \vec{e} – единичная нормаль к поверхности. Решение системы уравнения (1) с граничными условиями (2) зависит от геометрии разрядной камеры. На рис. 1 представлены рассматриваемые разрядные структуры с указанием размеров и использованных при рассмотрении систем координат.

Для случаев рис. 1, а, б, усредняя (1) по поперечному сечению с учетом граничных условий (2) и опуская для простоты символ усреднения, получаем:

$$D_{\alpha} \frac{\partial^2 n_{\alpha}}{\partial z^2} + \gamma S_{\alpha} + I_{\alpha} = 0, \quad (3)$$

где γ – геометрический фактор задачи, равный $2/R$ для случая рис. 1, а и $1/a + 1/b$ для рис. 1, б. Здесь D_{α} заменено средним значением, так как $D_{\alpha} \sim \sqrt{T} / N \sim 1 / \sqrt{T}$, и при изменении температуры по сечению, например, от 300 до 500 К D_{α} уменьшается всего на 20%. Для случая рис. 1, в, пренебрегая краевыми эффектами в плоскостях $z=0, L$ в силу $d \ll L$ получаем уравнение, совпадающее с (3), в котором координата z заменена на y , а геометрический фактор $\gamma=1/a$.

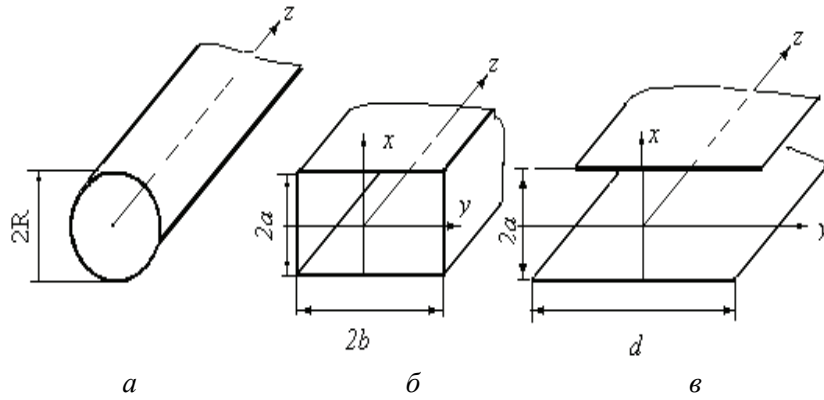


Рис.1. Разрядные камеры:
цилиндрическая (а), прямоугольная в сечении (б), щелевая (в)

Приближенное решение уравнения (3) вблизи границы при $z \geq 0$ будем искать в виде

$$n_{\alpha}(z) \approx n_{\alpha}^* + (n_{\alpha}^0 - n_{\alpha}^*) e^{-z/l_{\alpha}}, \quad (4)$$

где l_{α} – величина, характеризующая длину переходного участка от разрядной камеры к дополнительному объему. Определим l_{α} , подставляя решение (4) в уравнение (3). Тогда при $z=0$, $n_{\alpha}(0) = n_{\alpha}^0$ получаем:

$$\frac{1}{l_{\alpha}^2} \approx \frac{\gamma S_{\alpha}^0 + I_{\alpha}^0}{D_{\alpha} (n_{\alpha}^* - n_{\alpha}^0)}, \quad (5)$$

где $S_{\alpha}^0, I_{\alpha}^0$ – значение S_{α}, I_{α} при $n_{\alpha} = n_{\alpha}^0$. Расчеты, проведенные для смеси $CO_2-N_2-He-Xe$, показали, что величина $1/l_{\alpha}$ в широком диапазоне разрядных условий для различных компонент пропорциональна геометрическому фактору задачи γ с коэффициентом пропорциональности вблизи 0.5, то есть $1/l_{\alpha} = \gamma/2$. Используя (4) – (5), для потока частиц сорта α из разрядной камеры в дополнительный объем получаем

$$N_{\alpha} = -SJ_{\alpha} \cong SD_{\alpha} \frac{\gamma}{2} (n_{\alpha}^* - n_{\alpha}^0), \quad (6)$$

где S – граничная площадь поверхности, равная $2\pi R^2, 8ab, 4aL$ или $\pi R^2, 4ab, 2aL$ для рассматриваемых нами случаев, рис.1, когда связь с дополнительным объемом осуществляется через оба торца разрядной структуры или только через один. Из выражения (4) следует, что среднее значение концентрации частиц сорта α в разрядной камере близко к n_{α}^* , так как заметное отклонение $n_{\alpha}(z)$ от n_{α}^* происходит только в малой переходной области длиной l_{α} . Интегрируя уравнение (1) по объему активной среды с учетом граничных условий (2), получаем уравнение выражающее баланс частиц в разрядной камере объемом V_a :

$$N_{\alpha} = V_a (\gamma S_{\alpha} + I_{\alpha}), \quad (7)$$

Изменение концентрации компонент в дополнительном объеме V описываются системой уравнений баланса:

$$V \frac{dn_{\alpha}^0}{dt} = N_{\alpha} + L_{\alpha}, \quad (8)$$

где L_{α} – источник частиц сорта α вследствие химических реакций на поверхности стабилизатора газового состава смеси и других элементов конструкции.

Математическая модель оптимизации газоразрядного CO_2 -лазера

Для данного случая константы скоростей образования окислов азота малы и их концентрации незначительны [6, 7]. В связи с этим окислы азота в кинетике диссоциации не учитываются. Реакции, описывающие кинетику диссоциации CO_2 в ВЧ разряде, аналогичны реакциям, протекающим в плазме тлеющего разряда постоянного тока [2].

Динамика изменения концентраций n_α^0 в дополнительном объеме определяется системой уравнений баланса:

$$V \frac{dn_1^0}{dt} = S_c \beta J_{3c} - SD_1 \frac{\gamma}{2} (n_1 - n_1^0), \quad (9)$$

$$V \frac{dn_2^0}{dt} = SD_2 \frac{\gamma}{2} (n_2 - n_2^0) + Q_3 (n_4^0)^2 n_1^0, \quad (10)$$

$$n_1^0 - n_3^0 = n^0, \quad (11)$$

$$V \frac{dn_4^0}{dt} = SD_3 \frac{\gamma}{2} (n_3 - n_3^0) - 2V \frac{dn_2^0}{dt} - v, \quad (12)$$

где $L_1 = S_c \beta J_{3c}$ – источник CO_2 на поверхности стабилизатора газового состава с активной площадью S_c ; β – параметр, определяющий восстановительные свойства стабилизатора ($0 \leq \beta \leq 1$); v – скорость ухода кислорода вследствие внедрения, адсорбции и хемосорбции на электродах и других элементах конструкции; n_1^0 – концентрация молекул CO_2 при заполнении; J_{3c} – плотность потока молекул CO на стабилизатор, Q_i – константы химических реакций, где i – номер реакции. Величина J_{3c} определяется соотношением

$$J_{3c} = \frac{1}{4} n_3^0 \sqrt{\frac{8T_w}{\pi m_3}}, \quad (13)$$

где T_w – температура газа в дополнительном объеме, равная температуре охлаждаемых водой стенок разрядной камеры ($T_w \approx 300K$). В установившемся режиме при малой степени утечки атомарного кислорода состав смеси описывается параметром степени диссоциации α :

$$\alpha = \frac{n_3}{n_1 + n_3} = \frac{[CO]}{[CO_2] + [CO]}, \quad (14)$$

Общая концентрация атомов в активной зоне лазера, как следует из баланса давлений, равна:

$$N = \frac{T_w}{\langle T \rangle} \frac{N_0}{\xi}, \quad (15)$$

где T_w , $\langle T \rangle$ – температура газа в дополнительном объеме ($\sim 300K$) и средняя температура в активной зоне, $\xi = (1 + 0.5a\psi_{01})^{-1}$ – коэффициент, учитывающий рост концентрации частиц в активном элементе вследствие диссоциации молекул, $\psi_{01}, \psi_{05}, \psi_{06}, \psi_{07}$ – мольные доли соответствующих компонент ($CO_2 - N_2 - He - Xe$).

Результаты численного моделирования

На рис. 2 приведены результаты численных расчетов концентраций CO_2 в дополнительном объеме ($V=60 \text{ см}^3$) и в активном элементе, представляющем собой цилиндрический капилляр, открытый с одного торца, выполненный из керамики BeO длиной 14 см и радиу-

сом $R=0.1$ см. Первоначальный состав смеси – $CO_2 : N_2 : He : Xe = 1 : 0.8 : 4 : 0.2$, давление 100 Тор, разряд возбуждался постоянным током $i=2$ мА, $T_w \approx 300$ К, $S_c=10$ см², $\beta=0.1$.

Результаты расчета качественно согласуются с данными [10]. За время порядка 15 – 20 мин в дополнительном объеме и разрядном капилляре устанавливается стационарное значение концентраций, которое при отсутствии ухода кислорода из прибора не меняется с течением времени и определяется процессами диссоциации и рекомбинации в разрядном капилляре и рекомбинации на стабилизаторе газового состава смеси.

Последний может существенно (до 30 %) поднять равновесную концентрацию молекул CO_2 . На рис. 3, 4 представлены результаты расчета стационарных значений концентраций CO_2, O_2, CO и O , а также степень диссоциации молекул CO_2 от различных факторов при возбуждении разряда постоянным током в цилиндрическом капилляре в сравнении с экспериментальными данными [7]. При расчете динамики химического состава плазмы в качестве нулевого приближения принималась $\alpha = 0$, а при расчете стационарных значений концентрации использовалась величина $\alpha = 0.5$, обеспечивающая быструю сходимость вычислительного процесса. Константы Q_i

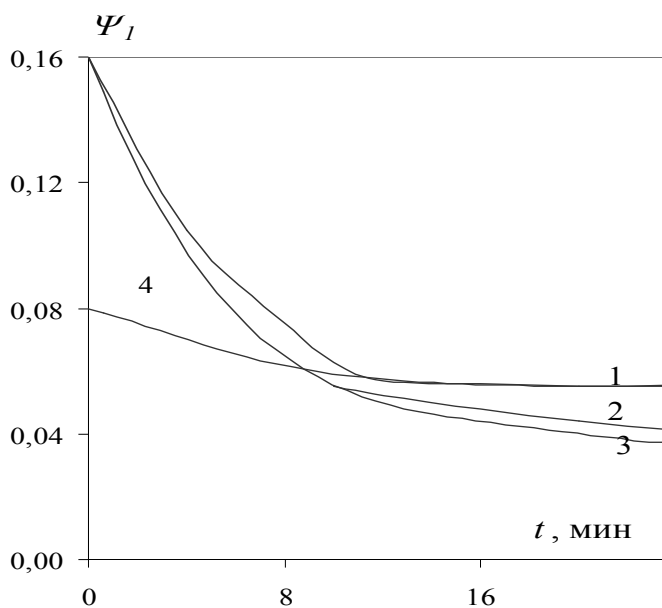


Рис. 2. Изменение во времени мольной доли CO_2, Ψ_1 в дополнительном объеме (1-3) и капилляре (4) при $\nu = 0$ (1, 4), 10^{-3} (2), 10^{-2} (3)

получены аналогично [2], а сечение диссоциации электронным ударом молекул CO_2 и O_2 – из работы [9].

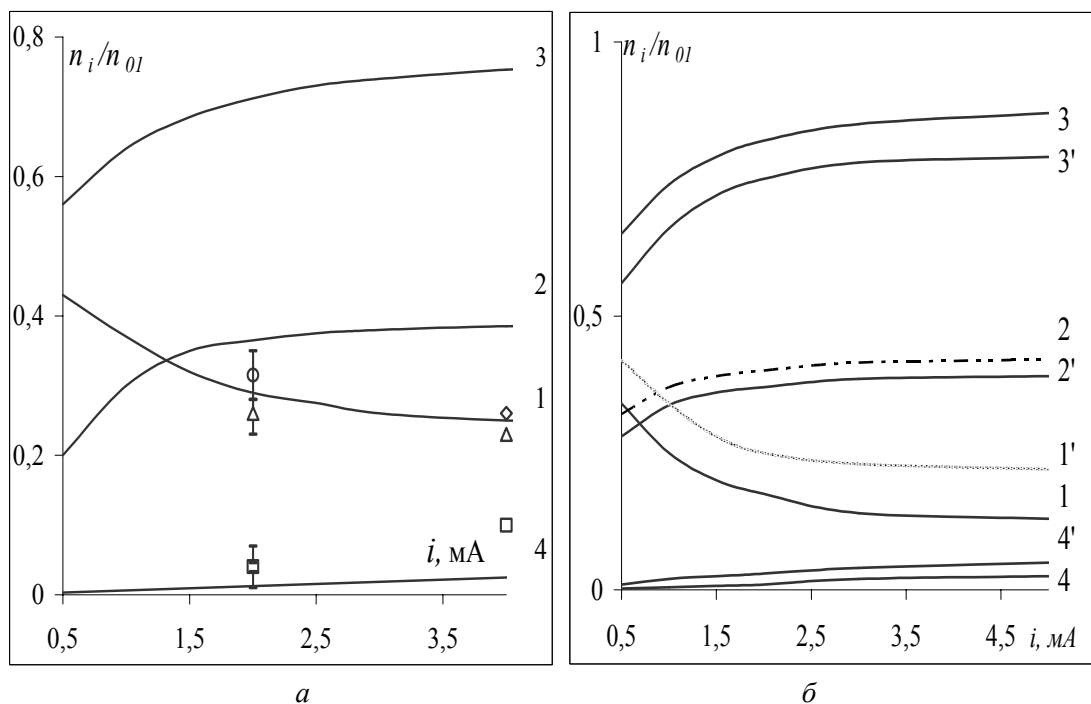


Рис. 3. Зависимость относительной концентрации частиц n_i / n_1^0 от тока разряда в установившемся режиме, CO_2 - 1, O_2 - 2, CO - 3, O - 4: а – при $p=100$ Тор, $R=0,125$ см, $T_w=293$ К для смеси $CO_2 : N_2 : He : Xe=1:1:8:0$, Δ - O_2 , \square - O , \circ - CO_2 - экспериментальные данные [7]; б – при $p=100$ Тор, $R=0,1$ см, $T_w=293$ К для 1:1:4:0.2 (1-4), для смеси 1:1:8:0 (1'-4')

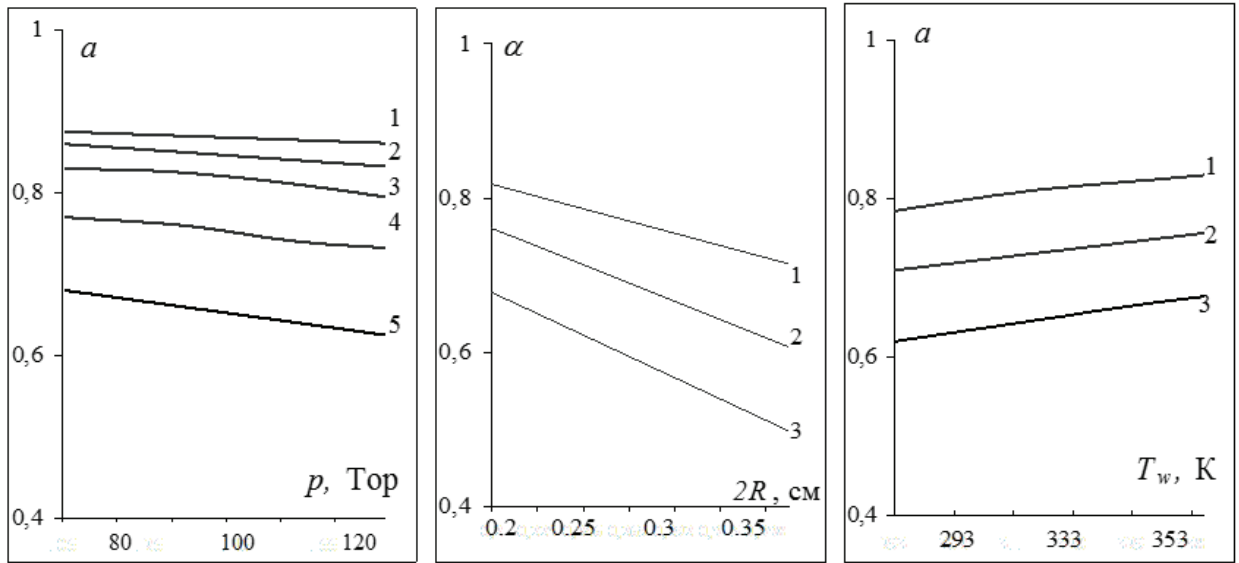


Рис. 4. Зависимости степени диссоциации α : от давления (а) 1:1:4:0.2 при $i=0.5$ мА (1), 3 (2), 2(3), 1 (4), 0.5 (5); от диаметра капилляра $2R$ (б) для смеси 1:1:8:0 при $i=0.5$ мА (1), 2(2) 1 (3); от температуры внешней поверхности капилляра T_w (в) при $R=0.125$ см для смеси 1:1:8:0, $i=0.5$ мА (1), 2(2), 1(3)

Для констант Q_I использовались результаты [1], полученные для молибденового стекла. Учитывая различие материалов, Q_I в расчетах корректировалась в сторону уменьшения на 20 – 30 %, что улучшило согласование расчетных и экспериментальных данных. Для ВЧ разряда использовалась аппроксимация

$$Q_I = 10^{-17} (0.46 + 25/j) \text{ см}^4 \text{ с}^{-1}, \quad (16)$$

где j – эффективное значение плотности тока проводимости.

Оптимизация теплового режима CO_2 -лазера

При расчете средней температуры газа в разряде использовалось стационарное уравнение теплопроводности, так как при ВЧ возбуждении период колебаний поля много меньше времени релаксации температуры:

$$\nabla \cdot \lambda \nabla T + u = 0, \quad (17)$$

где $\lambda(\vec{r})$, $u(\vec{r})$, $T(\vec{r})$ – коэффициент теплопроводности, объемная плотность мощности источников тепла и температура газа соответственно. Уравнение теплопроводности решалось для круглой, прямоугольной в сечении и щелевой разрядных камер. В качестве граничного условия использовалось равенство температуры на стенке величине T_w .

Для коэффициента теплопроводности смеси газов имеем [11]:

$$\lambda = \sum_{\alpha} \lambda_{\alpha} \left[1 + \Psi_{\alpha}^{-1} \sum_{\beta} A_{\alpha\beta} \Psi_{\beta} \right]^{-1} = \sum_{\alpha} \lambda_{\alpha} \beta_{\alpha}, \quad (18)$$

где $A_{\alpha\beta}$ – величины, слабо зависящие от температуры; λ_{α} – теплопроводность α -компоненты смеси, зависимость которой от температуры в широком интервале температур подчиняется линейному закону:

$$\lambda_{\alpha} = \lambda_{0\alpha} [1 + \kappa_{\alpha} (T - T_0)], \quad (19)$$

где $\lambda_{0\alpha}$ – теплопроводность при температуре T_0 ; κ_{α} – постоянная для данного газа. Используя (19), для коэффициента теплопроводности смеси (2.24) получаем линейную зависимость:

$$\lambda = \lambda_0 + \lambda_I T, \quad (20)$$

где $\lambda_0 = \sum_{\alpha} \beta_{\alpha} \lambda_{\alpha 0} (1 - \kappa_{\alpha} T_0)$; $\lambda_1 = \sum_{\alpha} \beta_{\alpha} \lambda_{\alpha} \kappa_{\alpha}$ – коэффициенты, определяемые составом смеси.

Решение уравнения (17) с использованием для теплопроводности формулы (20) позволяет получать распределения температуры и среднее значение температур для разрядов в камерах различных конфигураций. Считая, что распределение источников тепла $u(\vec{r})$ определяется пространственным распределением электронов и используя для последнего результаты [12] при ВЧ-возбуждении и данные работы [13] для проточных разрядов в цилиндрическом капилляре, можно показать, что в широком диапазоне разрядных условий максимальный перепад температур между плазмой и стенкой и средняя температура газа $\langle T \rangle$ определяются выражениями [14]:

$$\Delta T = \xi_1 \frac{\bar{u}}{\bar{\lambda}} = \xi_1 \frac{1 - \eta}{\lambda_0 + \lambda_1 \bar{T}} \frac{W_n}{V_a}; \quad (21)$$

$$\langle T \rangle = \frac{1}{2} \left[T_W - \frac{\lambda_0}{\lambda_1} + \sqrt{\left(T_W + \frac{\lambda_0}{\lambda_1} \right)^2 + 4 \xi_1 \xi_2 \frac{\bar{u}}{\lambda_1}} \right], \quad (22)$$

где \bar{u} – среднее по объему значение плотности источников тепла (удельная вкладываемая мощность); η – коэффициент полезного действия лазера (для CO_2 -лазеров ~ 0.1); $\bar{\lambda}$ – значение теплопроводности (20) при средней по объему разрядной камеры температуре $\langle T \rangle$; W_n – мощность накачки; V_a – объем активной среды; ξ_1 – геометрический фактор формы для поля температур, принимающий для рассматриваемых случаев значения: $R^2/4$, $3a^2b^2/2(2a^2+3b^2)$, $a^2/2$; ξ_2 – второй геометрический фактор формы, равный $1/2$, $4b/3(2b+a)$, $2/3$ для трех геометрий разрядной камеры соответственно.

Хотя распределение температуры газа в разряде зависит от распределения источников тепла, средняя температура определяется вкладываемой в разряд мощностью, геометрией разрядной камеры и теплопроводностью. Оптимальный тепловой режим реализуется, когда

$\langle T \rangle \leq T_{cr}$. Для уменьшения степени диссоциации можно использовать большой дополнительный объем, при этом увеличивается время выхода прибора на стационарный режим после перенаполнения. Можно увеличить площадь стабилизатора газового состава, использовать покрытие, обеспечивающее увеличение константы скорости Q_1 (для золотого покрытия Q_1 возрастает в 7 раз), или добавку в первоначальную смесь CO .

Для проверки изложенной в работе методики расчета применим ее для анализа результатов эксперимента [13]. На рис. 5 представлены результаты расчета выходной мощности CO_2 -лазера с ВЧ возбуждением при добавлении к исходной смеси CO в сравнение с экспериментальными данными [13]. Разряд возбуждался в камере размером $2a \times d \times L_a$

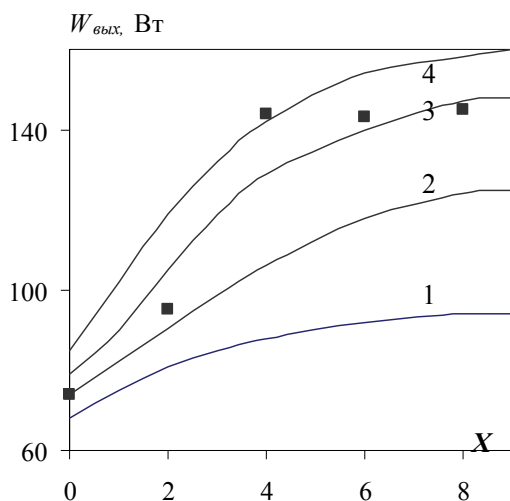


Рис. 5. Зависимость $W_{вых}$ для CO_2 -лазера от процентного содержания CO $X = (\psi_{03}/15.3)100\%$ при $k=1(1), 3(2), 7.5(3), 9(4)$, – расчет, ■ – эксперимент [15]

$= 0.2 \times 1.5 \times 37 \text{ см}^3$ при давлении наполнения $p=120 \text{ Тор}$, мощности накачки 240 Вт и первоначальном составе смеси $CO_2:CO:N_2:He:Xe = 1 : 1.5 : \psi_{03} : 12 : 0.8$. Разрядная камера помещалась в резонатор, образованный глухим ($\rho_2=0.955$) и выходным ($\rho_1=0.92$) плоскими зеркалами. Добавление CO в разряд совместно с использованием распределенного золотого катали-

затора на электродах приводит к существенному росту выходной мощности и к уменьшению времени установления равновесной концентрации компонент. Выходная мощность лазера связана с внутризональной мощностью [15]:

$$W_{\text{вых}} = \zeta K_{\text{ном}} L_a W, \quad (23)$$

где $\zeta = \sqrt{\rho_2} t / (\sqrt{\rho_1} + \sqrt{\rho_2}) (1 - \sqrt{\rho_1 \rho_2})$; t – коэффициент пропускания выходного зеркала; ρ_1, ρ_2 – эффективные коэффициенты отражения зеркал с учетом всех видов локальных потерь на концах активной среды. Внутризональная мощность

$$W = 1.71 a d \bar{I}_s (X - 1.25), \quad (24)$$

где X – превышение усиления над потерями; \bar{I}_s – средняя по сечению интенсивность насыщения. Численные коэффициенты в формуле (24) описывают отличие распределение поля излучения от поля плоской волны. При расчете X и \bar{I}_s использовались данные [15].

Состав смеси в установившемся режиме рассчитывался по изложенной методике с тем отличием, что ψ_{O_3} – мольная доля CO при наполнении, отличная от нуля, использовалась в качестве дополнительного параметра. Влияние золотого покрытия электродов учитывалось домножением на коэффициент k константы скорости рекомбинации молекул CO и O на стенке – Q_1 . Лучшее совпадение расчетных и экспериментальных данных соответствует значению $k=7.5$. Хуже соответствует данным эксперимента расчетное время установления равновесной концентрации компонент τ . Так, по расчетам при изменении k от 1 до 7,5 τ уменьшается от 30 до 4,5 мин, тогда как по данным [13] τ уменьшается от 35 до 1 мин. Возможная причина этого различия связана с неучетом рекомбинации на стенке атомов O в реакции $O + O^W \rightarrow O_2$.

Выводы

Предложены математические методы оптимизации параметров CO_2 -лазера, реализованные с помощью численного компьютерного моделирования. Результаты численных расчетов совпадают с результатами экспериментальных данных, при частичном несовпадении были установлены причины, связанные с неоптимальным учетом предложенной модели рекомбинации на стенке трубки атомов O в реакции $O + O^W \rightarrow O_2$. Результаты работы могут быть применены для оптимизации различных конструкций CO_2 -лазеров непрерывного действия.

Список литературы:

1. Звелто О. Принципы лазеров ; пер. под науч. ред. Т.А. Шмаонова. 4-е изд. СПб. : Лань, 2008. 720 с.
2. Баранов И.Я. Технология лазерной сварки, закалки и резки. СПб. : Балтийский гос. техн. ун-т "Военмех", 1999. 75 с.
3. Виттеман В. CO_2 лазер. Москва : Мир, 1990. 360 с.
4. Вейко В.П. Технологические лазеры и лазерное излучение. Москва : Наука, 2007. 52 с.
5. Технологические лазеры. Т.1: Расчет, проектирование и эксплуатация: справочник. Москва : Машиностроение, 1991. 432 с.
6. Лемешко Б. Ю. Методы оптимизации. Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2009. 126 с.
7. Смит К. Численное моделирование газовых лазеров. Москва : Мир, 1981. 515 с.
8. Пономаренко А. Г. Оптимизация и предельные характеристики CO_2 -лазеров // Прикладная механика и техническая физика. 1975. № 5. С. 120.
9. Dumitras C. CO_2 Laser – Optimisation and Application. 2012. 446 st.
10. Айхлер Ю. Лазеры: исполнение, управление, применение. Москва : Техносфера, 2008. 442с.
11. Григорьянц А.Г. Технологические процессы лазерной обработки. Москва : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 664 с.
12. Баранов И.Я. Технология лазерной сварки, закалки и резки. СПб. : Балтийский гос. техн. ун-т "Военмех", 1999. 75 с.
13. Климков Ю. М. Основы расчета оптико-электронных приборов с лазерами. Москва : Сов. радио, 1978. 264 с.
14. Пихтин А. Физические основы квантовой электроники и оптоэлектроники. Москва : Высш. шк., 1983. 303 с.
15. Байбородин Ю. В. Основы лазерной техники. К. : Выща шк., 1988. 383с.