

УДК 621.373.826.038

М.П. Данилаев, Ю.Е. Польский

РАСЧЕТ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА CO₂-ПЕРЕДАТЧИКА ЛИДАРНЫХ СИСТЕМ

Проведен анализ теплового режима различных конструкций разрядных камер CO₂-лазеров с воздушным охлаждением. Получено выражение для удельного энергосъема с единицы длины лазера. Рассмотрено явление термодиффузии для случая H-волноводного лазера. Были проведены экспериментальные исследования теплового режима CO₂-лазера.

Основным требованием, предъявляемым к CO₂-передатчикам лидарных систем, является стабильность параметров передающего лазера. Одним из дестабилизирующих факторов является нестабильный температурный режим. Для стабилизации температуры и обеспечения требуемого теплового режима обычно используют жидкостное охлаждение стенок разрядной камеры. Новые конструктивные подходы (коаксиальные лазеры [1, 2], щелевые лазеры [3, 4]) хотя и позволили увеличить энергосъем с единицы длины лазера, не снимают ограничение на жидкостное охлаждение. В то же время существует острая потребность в компактных передатчиках лидарных систем, не требующих жидкостного охлаждения.

В данной работе исследуются возможность обеспечения необходимого температурного режима, а также удельные характеристики трех типов разрядных камер CO₂-лазеров с диффузионным охлаждением, представленных на рис. 1 При этом хорошо изученная трубчатая конструкция использовалась как эталон для сравнения [5].

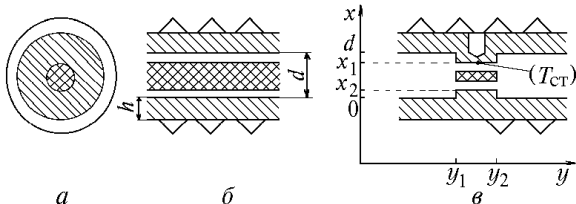


Рис. 1. Разрядные камеры: – область разряда; – охлаждаемая оребренная поверхность; – стенка с высокой теплопроводностью; T – точка измерения температуры в экспериментальной камере

Путем анализа температурного режима этих конструкций разрядных камер из основного уравнения термодинамики [7] находилось распределение температуры в разрядных камерах:

$$\frac{d}{dx} \left[K(T) \frac{dT}{dx} \right] + F(x) = \frac{K_0}{(a+1) T_0^a} \frac{d^2 \theta}{dx^2} + F(x) = 0, \quad (1)$$

где T – температура газа; T₀ – температура стенок разрядной камеры; K(T) – коэффициент теплопроводности: K(T) = K₀ (T/T₀)^a; K₀ – коэффициент тепло-

проводности газа при нормальных условиях; значение a зависит от параметров газа (a = 0,7 для богатых гелием смесей [1]); θ(T) = [T(x)]^{a+1}; F(x) – функция, описывающая распределение источников тепла в объеме. Рассматривались близкие к реальной ситуации модели распределения источников тепла в зоне разряда:

$$F(x) = \begin{cases} W_{уд}(1 - \eta) = \text{const} & | \text{ (а)} \\ W_{уд}(1 - \eta) 6 \frac{d-x}{d^2} x & | \text{ (б)}, \end{cases} \quad (2)$$

где W_{уд} – средний удельный энерговклад, Вт/см³; η – КПД лазера; d – расстояние между электродами. Граничные условия, налагаемые на уравнение (1), имеют вид

$$\theta(0) = \theta(d) = T_0^{a+1}. \quad (3)$$

С помощью уравнения (1) определялось выражение для температуры на оси разрядной камеры:

$$T_{ось} = T_0 \left[1 + 0,25 G_i \frac{W_{уд}(1 - \eta)(1 + a)}{K_0 T_0} d^2 \right]^{1/(a+1)}, \quad (4)$$

i = 1, 2, 3, 4.

Для лазера трубчатой конструкции G₁ = 0,4; для щелевого лазера G₂ = 1 (2а); G₃ = 30/48 (2б); для H-волноводного лазера

$$G_4 = 6 \left[-\frac{7d^2}{48} + \frac{(x_1 + x_2)d}{4} - \frac{x_1 x_2}{2} \right] / (x_2 - x_1)^2.$$

Эквивалентный диаметр трубки для H-волноводного и слабого лазеров, при которых распределение температуры совпадает с распределением температуры в трубке диаметром d, равен:

$$D_{эkv} = \sqrt{2,5 G_i d}. \quad (5)$$

Полагая параметры T_{ось}, η, T₀ близкими для лазеров всех трех конструкций, можно получить выражение для энергосъема с единицы длины лазера P_i:

$$P_i = \frac{1}{2G_i} \left(\frac{S}{d^2} \right) P_i^T. \quad (6)$$

Здесь P_l^T – энергосъем с единицы длины трубки; S – площадь поперечного сечения активного вещества, принимающего участие в генерации.

Накачка таких лазеров может осуществляться в непрерывном и импульсно-периодическом режимах. Наибольший интерес для рассматриваемого применения представляет импульсно-периодический (квазинепрерывный) режим работы. Следует отметить, что при таком режиме работы в H -волноводном лазере в отличие от слэб структуры наблюдается движение газа. Причиной этого является наличие градиента температуры между электродами и балластным объемом (рис. 1, в). Общий тепловой поток Q в этом случае определяется следующим образом:

$$Q = [(\lambda_1 + \lambda_2) + \alpha^2 k_B \gamma_i (1 - \gamma_i) n_0 D] \nabla_y T + \lambda_2 \nabla_x T. \quad (7)$$

Здесь $\lambda_{1(2)}$ – коэффициент теплопроводности газа (металла); α – термодиффузионный коэффициент; k_B – постоянная Больцмана; D – коэффициент диффузии; γ_i – мольная доля i -го газа; $n_0 = p/k_B T$; p – давление газа.

При расчете термодиффузионного коэффициента были сделаны следующие допущения:

1. Отношение смеси газов CO_2 -лазера составляет $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:1:18$.
2. Для термодинамических расчетов предположим, что $m(\text{CO}_2) = m(\text{N}_2) \gg m(\text{He})$, т.е. что смесь бинарна: $m_1 \gg m_2$. Тогда [6]

$$\alpha = (6C^* - 5) \frac{S_1 \gamma_1 - S_2 \gamma_2}{Q_1 \gamma_1 + Q_2 \gamma_2 + Q_{12} \gamma_1 \gamma_2}.$$

Коэффициенты C^* , S_1 , S_2 , Q_1 , Q_2 , Q_{12} приведены в [6]. Энергосъем с единицы длины лазера в этом случае составляет:

$$P_l \geq \eta QS/L, \quad (8)$$

где L – длина резонатора.

Одной из причин неустойчивости разряда является превышение температуры в разрядной камере лазера некоторого критического ее значения. Особенно большое значение это имеет при воздушном охлаждении стенок разрядной камеры. Для определения температуры на оси камеры необходимо оценить эффективность теплоотвода из зоны разряда.

В стенке разрядной камеры тепло из зоны разряда отводится посредством теплопередачи. В расчетах предполагалась однородность материала стенки. Уравнение теплопроводности в данном случае имеет вид

$$\partial^2 T / (\partial x^2) = 0. \quad (9)$$

Рассматривались граничные условия третьего рода. Тогда температура внутренней поверхности стенки разрядной камеры определяется выражением

$$T_0 = T_{\text{ст}} + Q_p \delta / \lambda_2, \quad (10)$$

где $T_{\text{ст}}$ – измеряемая температура; Q_p – рассеиваемая тепловая мощность; δ – толщина стенки.

Для более эффективного отвода тепла от стенок разрядной камеры использовался радиатор. Из теплового баланса получалось уравнение распределения температуры в ребре [7]:

$$d^2 \vartheta / (d\xi^2) - (\text{Bi}) \vartheta = 0, \quad (11)$$

где Bi – число Био; $\vartheta(x) = [T(x) - T_{\text{возд}}] / [T_{\text{ст}} - T_{\text{возд}}]$; $\xi = x/l$, l – высота ребра; $T_{\text{возд}}$ – температура воздуха над поверхностью камеры. Для ребра с конвективной теплоотдачей граничные условия имеют вид

$$T(0) = T_{\text{ст}}; \quad -\lambda_2 \frac{dT}{dx} \Big|_{x=l} = h_c [T(l) - T_{\text{ст}}], \quad (12)$$

где h_c – средний коэффициент теплопередачи.

Таким образом, на поверхности торца распределение температуры определяется следующим образом:

$$\vartheta(\xi) = \frac{\text{ch}[\sqrt{\text{Bi}}(1-\xi)] + \sqrt{\text{Bi}}(B/\Pi l) \text{sh}[\sqrt{\text{Bi}}(1-\xi)]}{\text{ch}[\sqrt{\text{Bi}}] + \sqrt{\text{Bi}}(B/\Pi l) \text{sh}[\sqrt{\text{Bi}}]}.$$

Здесь B – площадь поперечного сечения ребра; Π – периметр ребра. Расчет радиатора, который проводился по методике, предложенной в работе [8], показывает, что при условии принудительного охлаждения радиатора отводимая удельная тепловая мощность составляет 3 Вт/(град·дм²); коэффициент увеличения площади оребрения составил 6 (дм²/дм²). Охлаждение радиатора CO_2 -лазера мощностью 100 Вт осуществлялось вентиляторами, которые крепились к торцу разрядной камеры. Расчетные данные были подтверждены экспериментально (рис. 2).

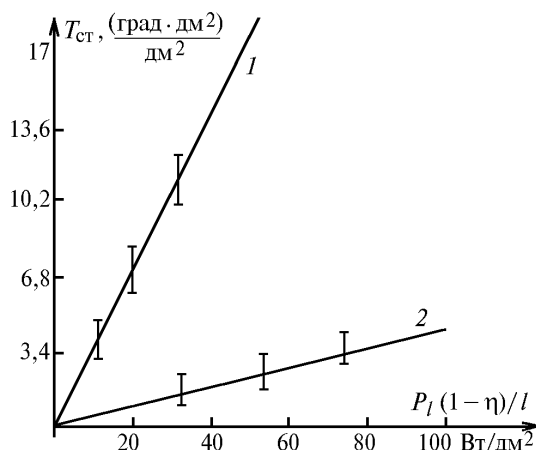


Рис. 2. График эксперимента. Экспериментальный разброс значений показан отрезками: 1 – зависимость приращения температуры, нормированная на коэффициент увеличения площади оребрения от тепловой рассеиваемой мощности радиатора без принудительного обдува, при этом приращение температуры к рассеиваемой радиатором мощности составляло 24 град/(кВт·дм); 2 – зависимость приращения температуры, нормированная на коэффициент увеличения площади оребрения от тепловой рассеиваемой мощности радиатора с обдувом. Здесь отношение приращения температуры к рассеиваемой радиатором мощности составило 7 град/(кВт·дм)

Для определения температуры на оси разрядной камеры $T_{\text{ось}}$ (3) экспериментальным путем определялась температура $T_{\text{ст}}$ внутренней стенки разрядной камеры (см. рис. 1, в). Граничные условия для уравнения (3) находились из выражения (10). Расчет температуры на оси разрядной камеры велся на ЭВМ. При обдуве радиатора разрядной камеры H -волноводного лазера температура на ее оси оказывалась меньше критической температуры, что удовлетворяет условию устойчивого горения разряда.

Таким образом,

1. Проведен сравнительный анализ температурного режима для разрядных камер трех типов конструкций, и получено выражение (6) удельного энерго-съемы с единицы длины лазера.

2. Теоретические расчеты подтверждены экспериментально.

3. Из полученных расчетных и экспериментальных результатов видно, что принудительное воздуш-

ное охлаждение способно обеспечить необходимый температурный режим CO_2 -лазеров с выходной мощностью до 100 Вт.

Анализ и оптимизация систем накачки и резонаторов таких лазеров будут рассмотрены позже.

1. Вайсфельд М.П., Польский Ю.Е. // Квантовая электроника. 1981. Т. 8. N 10. С. 2230 – 2233.
2. Воронов В.И., Большаков С.С., Лепакин А.Б. и др. // Приборы и техника эксперимента. 1993. N 3. С. 162 – 167.
3. Максименко А.Ф., Проворов А.С., Реушев М.Ю. и др. // Квантовая электроника. 1994. Т. 21. N 00 С. 827 – 829.
4. Мышенков В.И., Яценко Н.А. // Квантовая электроника. 1981. Т. 8. N 10. С. 2121 – 2129.
5. Тычинский В.П. // Успехи физических наук. 1967. Т. 91. N 3. С. 389 – 424.
6. Термодинамика газов / Под ред. Зуева. М.: Машиностроение, 1970. 169 с.
7. Основы теплопередачи / Ф. Крейт, У. Блэк. М.: Мир, 1983. 384 с.
8. Теплообмен в радиоэлектронных устройствах / Г.Н. Дульнев, Э.М. Семешкин. Л.: Энергия, 1968. 273 с.

Казанский государственный технический университет
им. А.Н. Туполева

Поступила в редакцию
2 июля 1996 г.

M.P. Danilaev, Yu.E. Polskii. Estimate of Thermal Parameters of CO_2 -transmitter for Lidar Systems.

The thermal regime analysis of discharge chamber difference construction of CO_2 -laser with air cooling is conducted. Expression for specific output power by per unit length is obtained. Termidiffusion of H-waveguide laser is considered. The experiment research of CO_2 -laser thermal regime is conducted.