

基于遗传算法的快轴流 CO<sub>2</sub>激光放大器的参数优化游聪<sup>1</sup>, 黄维<sup>1</sup>, 林高洁<sup>1</sup>, 李波<sup>1\*</sup>, 赵江<sup>2</sup>, 胡友友<sup>3</sup><sup>1</sup>华中科技大学光学与电子信息学院, 湖北 武汉 430074;<sup>2</sup>湖北大学微电子学院, 湖北 武汉 430062;<sup>3</sup>江苏科技大学理学院, 江苏 镇江 212003

**摘要** 获得 13.5 nm 极紫外光刻光源的主流方案为激光激发等离子体, 即利用高功率、高重复频率、高光束质量的短脉冲 CO<sub>2</sub> 激光与液滴锡靶作用产生极紫外光。高功率 CO<sub>2</sub> 激光由振荡器产生的高重复频率 CO<sub>2</sub> 种子经多级放大产生, 所以功率放大器是驱动光源系统的核心器件之一。建立了射频激励快轴流 CO<sub>2</sub> 激光放大器的六温度模型, 可以模拟计算放大过程中稳态与瞬态的能量分布情况、光强变化情况、增益系数等。以此模型为适应度函数, 采用遗传算法对自研射频激励快轴流 CO<sub>2</sub> 激光放大器的腔压和 CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>、He 气体体积比进行全局优化, 优化结果为 80 mbar (1 bar=100 kPa) 和 V(CO<sub>2</sub>): V(N<sub>2</sub>): V(He)=12.2%: 15.3%: 72.5%。在波长 10.6 μm 种子光注入功率 110 W 的情况下, 放大器的激光输出功率从 2504 W 提高到 3422 W, 验证了该方法的可行性和有效性。

**关键词** 激光技术; 极紫外; CO<sub>2</sub> 激光放大; 六温度模型; 遗传算法

中图分类号 TN24

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL231509

## 1 引言

13.5 nm 的极紫外光 (EUV) 是当下波长最短的商用光刻光源, 产生 EUV 光的主流方案为激光激发等离子体, 即利用高功率、高重复频率、高光束质量的短脉冲 CO<sub>2</sub> 激光与液滴锡靶作用产生等离子体辐射, 经过收集和选择性滤波后得到中心波长为 13.5 nm 的高功率极紫外光源<sup>[1]</sup>。CO<sub>2</sub> 激光转换为 EUV 光的效率 (CE) 在 6% 左右<sup>[2]</sup>, 因此为满足光刻工艺对 EUV 光功率的要求, 需要使用高光束质量的短脉冲种子光与多级功率放大器的主振荡功率放大 (MOPA) 结构<sup>[3]</sup>产生高达数十千瓦的 CO<sub>2</sub> 激光。激光功率放大器是短脉冲 CO<sub>2</sub> 激光放大的核心器件, 荷兰 ASML 公司已经产业化的 EUV 光刻机光源中使用的 CO<sub>2</sub> 功率放大系统为德国 TRUMPF 公司生产的高功率激光放大器, 其采用了四级级联的射频 (RF) 激励快轴流 CO<sub>2</sub> 激光功率放大器<sup>[4]</sup>。因此, 本文旨在优化射频激励快轴流 CO<sub>2</sub> 激光功率放大器的工作参数, 获得更好的增益性能和更高的输出功率。

CO<sub>2</sub> 激光放大器增益时域特性研究多使用 Frantz-Nodvik (F-N) 方程<sup>[5]</sup>、速率方程<sup>[6]</sup>、温度模型<sup>[7]</sup>, 其中六温度模型<sup>[8]</sup>涉及能级最丰富, 常用来仿真激光放大器的增益、各振动能级温度和输出光波形等参数的时域演变特性, 适用于对放大器内部复杂动力学过程的研究。一般来说, 射频激励快轴流激光放大器的输出功

率与种子光功率、气体成分比例、射频注入功率、放电管径、气体压力和流量等有关。通过六温度模型只能优化单个参数, 这不可避免地容易陷入局部优化, 且工作量过大。因此, 需要对放大器采用全局优化, 同时优化放大器多个参数。遗传算法 (GA) 在激光器的研究和设计方面, 已有成功的应用案例<sup>[9]</sup>, 在其他光学领域也有诸多应用<sup>[10]</sup>。遗传算法是全局优化的方法之一, 其仿照生物进化过程, 基于基因组合和自然选择原理, 可同时确定多个最佳参量。基因是遗传算法的基本单元, 是一个参数的二进制编码, 一系列基因组成染色体。每个染色体都有一个相关的目标函数, 根据其各自的目标函数进行排序, 并且经过杂交和突变不断迭代优化寻找多个参数的最佳值。

本文首先基于六温度模型, 分析放大器内部动力学过程, 可以仿真获得放大过程中稳态与瞬态的能量分布情况、光强变化情况、增益系数等。进而以该模型作为适应度函数, 使用遗传算法来优化快轴流 CO<sub>2</sub> 激光放大器中的气体比例和气体总压强, 在全局范围内寻找最优参量组合, 以获得最大的激光放大输出功率, 并且通过搭建的实验平台, 验证了方案的可行性。

## 2 基本原理

### 2.1 动力学模型

常规 CO<sub>2</sub> 的光谱范围为 9~11 μm<sup>[11]</sup>, 本文主要讨论的是其中最强的 10.6 μm (P(20)) 单线放大, 激光能

收稿日期: 2023-12-11; 修回日期: 2024-01-26; 录用日期: 2024-02-09; 网络首发日期: 2024-02-20

通信作者: \*libohust@hust.edu.cn

级如图 1 所示。六温度模型涉及的能级包括:对称振动能级(10<sup>0</sup>0)、弯曲振动能级(01<sup>1</sup>0)、反对称振动能级(00<sup>0</sup>1)、N<sub>2</sub>分子振动能级( $\nu=1$ )、CO分子振动能级( $\nu=1$ ),其可以比较全面地反映CO<sub>2</sub>激光放大器的工作气体中分子振动或转动模式之间的能量转移过程。如图 1 所示,对称振动能级(10<sup>0</sup>0)、弯曲振动能级(01<sup>1</sup>0)、反对称振动能级(00<sup>0</sup>1),N<sub>2</sub>分子振动能级( $\nu=1$ ),CO分子振动能级( $\nu=1$ )和环境温度的能量分别为 $E_1$ 、 $E_2$ 、 $E_3$ 、 $E_4$ 、 $E_5$ 、 $E$ ,相应地,各振动模式等效电子温度分别为 $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ 、 $T_4$ 、 $T_5$ 、 $T$ <sup>[12]</sup>。

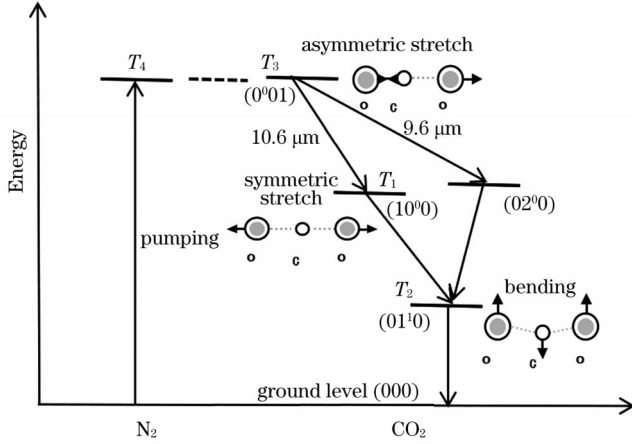


图 1 CO<sub>2</sub>激光的能级图

Fig. 1 Energy levels diagram of CO<sub>2</sub> laser

在整个复杂的动力学过程中,电子碰撞激励CO<sub>2</sub>的对称振动模式、弯曲振动模式、反对称振动模式、N<sub>2</sub>分子振动模式、CO分子振动模式对应的电子振动激励速率用 $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_4$ 和 $X_5$ 表示,振动态波数分别记为 $\nu_1$ 、 $\nu_2$ 、 $\nu_3$ 、 $\nu_4$ 、 $\nu_5$ 。各模式之间发生能量交换, $t_{31}^{-1}$ 表示CO<sub>2</sub>分子00<sup>0</sup>1与10<sup>0</sup>0和01<sup>1</sup>0能量交换的弛豫速率, $t_{51}^{-1}$ 表示CO分子振动模式与CO<sub>2</sub>分子10<sup>0</sup>0和01<sup>1</sup>0能级做

能量交换的弛豫速率。剩余能量交换的弛豫速率表示为 $t_{ij}^{-1}$ , $i$ 、 $j$ 分别代表不同振动能级,如 $t_{53}^{-1}$ 表示CO分子与CO<sub>2</sub>分子00<sup>0</sup>1能级发生共振能量转移的弛豫速率。相应地,CO<sub>2</sub>分子三种振动模式、N<sub>2</sub>振动模式、CO振动模式的能量密度分别为

$$E_1 = \frac{N_{\text{co}_2} h \nu_1}{\exp\left(\frac{h \nu_1}{k T_1}\right) - 1}, \quad (1)$$

$$E_2 = \frac{N_{\text{co}_2} h \nu_2}{\exp\left(\frac{h \nu_2}{k T_2}\right) - 1}, \quad (2)$$

$$E_3 = \frac{N_{\text{co}_2} h \nu_3}{\exp\left(\frac{h \nu_3}{k T_3}\right) - 1}, \quad (3)$$

$$E_4 = \frac{N_{\text{N}_2} h \nu_4}{\exp\left(\frac{h \nu_4}{k T_4}\right) - 1}, \quad (4)$$

$$E_5 = \frac{N_{\text{co}} h \nu_5}{\exp\left(\frac{h \nu_5}{k T_5}\right) - 1}. \quad (5)$$

环境能量密度为

$$E = \left( \frac{5}{2} N_{\text{co}_2} + \frac{5}{2} N_{\text{N}_2} + \frac{5}{2} N_{\text{co}} + \frac{3}{2} N_{\text{He}} \right) k T, \quad (6)$$

式中: $T$ 为气体(环境)温度,初始值设置为300 K; $N_{\text{co}_2}$ 、 $N_{\text{N}_2}$ 、 $N_{\text{He}}$ 和 $N_{\text{co}}$ 分别表示四种气体的粒子数密度; $h$ 为普朗克常数; $k$ 为玻尔兹曼常数。

利用六温度模型描述CO<sub>2</sub>激光放大动力学过程,实质是求解各振动模式等效温度与粒子数密度和能量之间建立联系的微分方程组,可以列出快轴流CO<sub>2</sub>激光放大器中各振动模式能量变化的微分方程组<sup>[13]</sup>

$$\frac{dE_1}{dt} = N_e(t) f N_{\text{co}_2} h \nu_1 X_1 + h \nu_1 \Delta N W I_{\text{in}}(t) + \left( \frac{h \nu_1}{h \nu_3} \right) \frac{E_3 - E_3(T, T_1, T_2)}{t_3(T, T_1, T_2)} - \frac{E_1 - E_1(T)}{t_{10}(T)} - \frac{E_1 - E_1(T_2)}{t_{12}(T_2)} + \left( \frac{h \nu_1}{h \nu_5} \right) \frac{E_5 - E_5(T, T_1, T_2)}{t_5(T, T_1, T_2)} - \frac{E_1}{t_F}, \quad (7)$$

$$\frac{dE_2}{dt} = N_e(t) f N_{\text{co}_2} h \nu_2 X_2 + \left( \frac{h \nu_2}{h \nu_3} \right) \frac{E_3 - E_3(T, T_1, T_2)}{t_3(T, T_1, T_2)} - \frac{E_2 - E_2(T)}{t_{20}(T)} - \frac{E_1 - E_1(T_2)}{t_{12}(T_2)} + \left( \frac{h \nu_2}{h \nu_5} \right) \frac{E_5 - E_5(T, T_1, T_2)}{t_5(T, T_1, T_2)} - \frac{E_2}{t_F}, \quad (8)$$

$$\frac{dE_3}{dt} = N_e(t) f N_{\text{co}_2} h \nu_3 X_3 - h \nu_3 \Delta N W I_{\text{in}}(t) - \frac{E_3 - E_3(T, T_1, T_2)}{t_3(T, T_1, T_2)} + \frac{E_4 - E_4(T_3)}{t_{43}(T)} + \left( \frac{h \nu_3}{h \nu_5} \right) \frac{E_5 - E_5(T, T_3)}{t_5(T, T_3)} - \frac{E_3}{t_F}, \quad (9)$$

$$\frac{dE_4}{dt} = N_e(t) f N_{\text{N}_2} h \nu_4 X_4 - \frac{E_4 - E_4(T_3)}{t_{43}(T)} + \left( \frac{h \nu_4}{h \nu_5} \right) \frac{E_5 - E_5(T, T_4)}{t_5(T, T_4)} - \frac{E_4}{t_F}, \quad (10)$$

$$\frac{dE_5}{dt} = N_e(t) (1-f) N_{\text{co}} h \nu_5 X_5 - \frac{E_5 - E_5(T, T_3)}{t_{53}(T, T_3)} - \frac{E_5 - E_5(T, T_4)}{t_{54}(T, T_4)} - \frac{E_5 - E_5(T, T_1, T_2)}{t_5(T, T_1, T_2)} - \frac{E_5}{t_F}, \quad (11)$$

$$\frac{dE}{dt} = \frac{E_1 - E_1(T)}{t_{10}(T)} + \frac{E_2 - E_2(T)}{t_{20}(T)} + \left(1 - \frac{hv_1}{hv_3} - \frac{hv_2}{hv_3}\right) \frac{E_3 - E_3(T, T_1, T_2)}{t_3(T, T_1, T_2)} + \left(1 - \frac{hv_4}{hv_5}\right) \frac{E_5 - E_5(T, T_4)}{t_{54}(T, T_4)} + \left(1 - \frac{hv_3}{hv_5}\right) \frac{E_5 - E_5(T, T_3)}{t_{53}(T, T_3)} + \left(1 - \frac{hv_1}{hv_5} - \frac{hv_2}{hv_5}\right) \frac{E_5 - E_5(T, T_1, T_2)}{t_5(T, T_1, T_2)} - \frac{E}{t_F}, \quad (12)$$

式中:  $f$  为  $\text{CO}_2$  分子的解离比, 由于目前不做过多讨论, 设其等于 0.1;  $N_e(t)$  表示激励电子数密度;  $t_F = l/v_g$  表示气体分子在放电区的驻留时间;  $l$  为放电管长度;  $v_g$  是气体流速;  $I_{in}(t)$  表示种子光变化;  $\Delta N$  为上下能级粒子数密度之差。

$$\Delta N = N_{001}P(J(001)) - \frac{2J+1}{2J+3}N_{100}P(J+1), \quad (13)$$

式中:  $N_{001}$  为上能级粒子数密度;  $N_{100}$  为下能级粒子数密度;  $P(J+1)$  为转动配分函数。

$$P(J(001)) = \frac{2hcB_{\text{CO}_2}}{kT}(2J+1)\exp\left[-\frac{hcB_{\text{CO}_2}J(J+1)}{kT}\right], \quad (14)$$

式中:  $B_{\text{CO}_2}$  为  $\text{CO}_2$  分子的转动常数;  $c$  为光速;  $J(001)$  为转动量子数。

$W$  和  $S$  分别表示为

$$W = \frac{F\lambda^2}{4\pi\nu\Delta\nu\tau_{sp}}, \quad (15)$$

$$S = \frac{2\lambda^2 d\nu}{\pi\tau_{sp}A\Delta\nu}, \quad (16)$$

式中:  $\lambda$  为激光波长;  $\nu$  为激光频率;  $\Delta\nu$  激光跃迁线宽;  $d\nu$  为激光发射线宽;  $\tau_{sp}$  为自发辐射寿命;  $A$  为种子光光束截面面积;  $F = \frac{1}{L}$  为填充因子, 其中  $L$  为放大器总光程。激光线宽表示为

$$\Delta\nu = \sum_l \frac{N_l Q_l}{\pi} \left[ \frac{8kT}{\pi} \left( \frac{1}{M_{\text{CO}_2}} + \frac{1}{M_l} \right) \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (17)$$

式中:  $M_{\text{CO}_2}$  和  $M_l$  为气体质量;  $N_l$  为单位体积分子数;  $Q_l$  为  $\text{CO}_2$  分子与气体分子的碰撞截面。

由于脉冲放大过程的实质是一系列重复单脉冲的周期性放大, 并且前一个脉冲离开放大器时, 后一个脉冲有充足时间重新建立平衡, 因此只用考虑单个脉冲放大的三个过程: 建立平衡、维持平衡、提取增益。具体的仿真实验流程图如图 2 所示。

建立平衡阶段是反转粒子数积累的过程, 维持平衡阶段存在稳态条件, 各振动温度对时间的导数均为 0, 微分方程组转化为代数方程组, 表示为

$$\frac{dE_1}{dt} = \frac{dE_2}{dt} = \frac{dE_3}{dt} = \frac{dE_4}{dt} = \frac{dE_5}{dt} = \frac{dE}{dt} = 0. \quad (18)$$

利用 Matlab 的 Newton-Raphson 算法求解上述方程组, 得到等效振动温度解, 进而计算小信号增益

$$g_0 = \Delta N \frac{A_{21}c^2}{8\pi\nu_0^2} g(\nu, \nu_0), \quad (19)$$

式中:  $A_{21}$  为自发辐射系数;  $\nu_0$  为谱线中心频率;

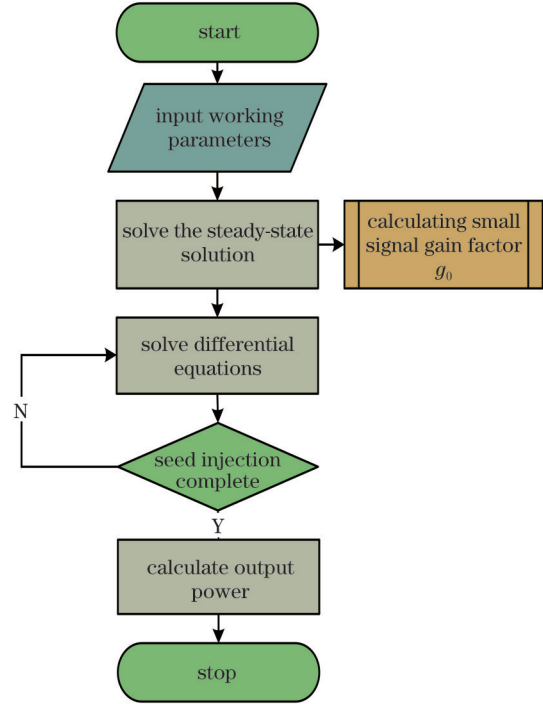


图 2 仿真实验流程图

Fig. 2 Flow chart of simulation experiment

$g(\nu, \nu_0)$  为归一化线型函数;  $\Delta N$  为反转粒子数。将稳态解作为增益提取阶段的计算初值(边界条件)。在增益提取阶段, 放大器某一微小时段内输出的光子密度既取决于该时刻的反转粒子数密度, 也取决于入射的光子数密度  $I_{in}(t)$ , 所以需要采用时域微分法求解各振动温度。放大器内光子的时域变化表示为

$$\frac{dI}{dt} = -\frac{I_{in}(t) + I_{nei}(t)}{\tau_c} + ch\nu_0 \left[ \frac{\Delta N W I_{in}(t)}{h} + N_{001}P(J)S \right], \quad (20)$$

式中:  $I_{nei}(t)$  为腔内光强变化。光子在放大器内的寿命  $\tau_c$ , 表示为

$$\tau_c = -\frac{2L}{c(\ln R_1 + 2\ln R_2)}, \quad (21)$$

式中:  $R_1$  为输入窗口镜的反射率;  $R_2$  为输出窗口镜的反射率。

上下激光振动能级的转动亚能级之间的反转粒子数密度的时间演化公式为

$$\frac{d\delta_j}{dt} = -2\delta_j \frac{W}{h} I - \frac{\delta_j - P(J)\Delta N}{\tau_r}, \quad (22)$$

式中:  $\delta_j$  为激光上下能级的转动亚能级的反转粒子数密度;  $\tau_r$  为转动弛豫时间。

采用龙格-库塔法解微分方程, 得到瞬态解, 根据

输出脉冲的时域脉冲演化波形,求得输出功率为

$$P_{out} = Af_p \sum I(t), \quad (23)$$

式中: $A$ 为光束面积; $f_p$ 为种子光重复频率。

表 1 给出了仿真实验所用到的相关参数。

表 1 仿真实验各参数

Table 1 Parameters of the simulation experiment

$B_{CO_2}$	Dissociation ratio $f$	Total path length $L$ /cm	Effective discharge length $l$ /cm	Gas flow rate / (m/s)	Ambient temperature $T$ /K	$R_1$ reflectivity	$R_2$ reflectivity
0.4	0.1	1800	752	200	300	0.01	0.01

### 2.2 遗传算法

遗传算法是一种基于自然选择和遗传学机制的优化搜索算法,计算成本较低,能有效地解决微小变化所引起的非线性问题<sup>[14]</sup>。优化问题可以表示为:使用遗传算法同时优化放大器气体比例和气压,即发现一组三个气体压力的值(三个值之和为总腔压),以获得最大的激光放大输出功率。在优化过程中,假设所有参数,包括种子重复频率、种子光功率、射频功率幅值和占空比等是固定的,仅改变气体成分比例和气压。表 2 给出了

快速轴流 CO<sub>2</sub>激光放大器的参数和工作条件。

其中,使用四台最大功率为 22 kW、输出阻抗为 50 Ω 的射频电源激励 32 根放电管,即最高射频功率可达 88 kW,在占空比固定的情况下,射频输出功率正比于射频功率幅值。受放大器热交换能力所限,本文使用的射频功率幅值为 80%。对于当前种子光,继续提升射频功率幅值至 100%,种子光放大倍数不再提升,受热效应的影响反而有所下降,所以将其取固定值优化气压和气体比例。

表 2 放大器各参数

Table 2 Parameters of the amplifier

Seed light wavelength / $\mu$ m	Seed light repetition rate /kHz	Seed light power /W	RF amplitude /%	RF duty cycle /%
10.591	20	110	80	75

图 3 给出了用于优化激光放大器气压比的遗传算

法的流程图,具体解释如下:

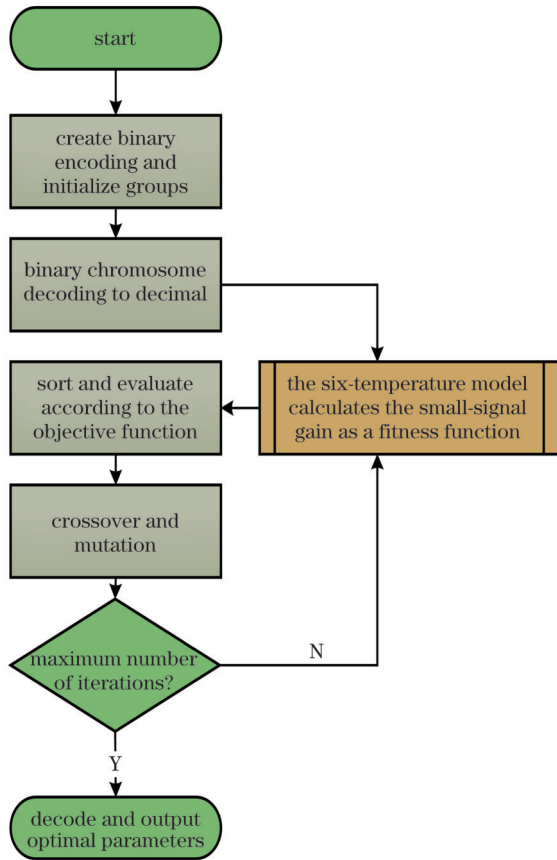


图 3 优化流程图

Fig. 3 Optimization flowchart

1) 种群初始化。遗传算法中初始种群的生成通常是随机进行的,首先定义三种气体压力的二进制编码,三组气体均在 1~80 mbar(1 bar=100 kPa) 范围内变动,一组编码组成一个染色体,然后随机生成包含 500 个染色体的初始群体。

2) 调用子程序。将二进制字符串解码为十进制,调用六温度模型,计算小信号增益、激光输出功率,小信号增益为目标函数,输出激光的时域脉冲演化波形和激光功率为参考,然后返回主程序。

3) 选择。根据目标函数对染色体进行排序。采用轮盘赌,每个个体被选中并保存下来的概率为该个体的适应度函数值在整个种群适应度函数值总和中所占的比例。

4) 杂交。选择杂交亲本并形成新的后代,本工作中使用单点杂交。

5) 突变。以 2% 的概率,在基因的某一位上取反运算,来改变染色体列表中的一小部分位。

6) 染色体评价。在变异之后,针对所有染色体计算目标函数,然后重复从步骤 2~6 的过程,直到找到与最大小信号增益系数匹配的最佳染色体,其对应于 CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub> 和 He 气体压力的优化值。

搜索最优解需要通过实验调整与遗传算法相关的一些特征参数,例如群体大小、选择和交叉函数、变异率等。表 3 列出了本文计算中使用的遗传算法的一些参数。

表 3 遗传算法中使用的数据  
Table 3 Data used in genetic algorithm

Initial chromosome count	Number of genes	Number of bytes per gene	Select an algorithm	Single point crossover	Mutation probability /%
500	3	8	Roulette	Random	2

### 2.3 实验平台

实验所用的自研射频激励快轴流 CO<sub>2</sub> 激光放大器结构示意图如图 4 所示。放大器主要由外包电极的放电管、折叠腔、快速流动气体循环系统(风机、热交换机)、混

气单元、真空泵、RF 激励电源以及基于 Programmable Logic Controller(PLC) 的控制系统等部分组成。输入窗口与输出窗口均为 ZnSe 片,且保持一定的角度并非完全平行,防止产生自发辐射放大(ASE)。

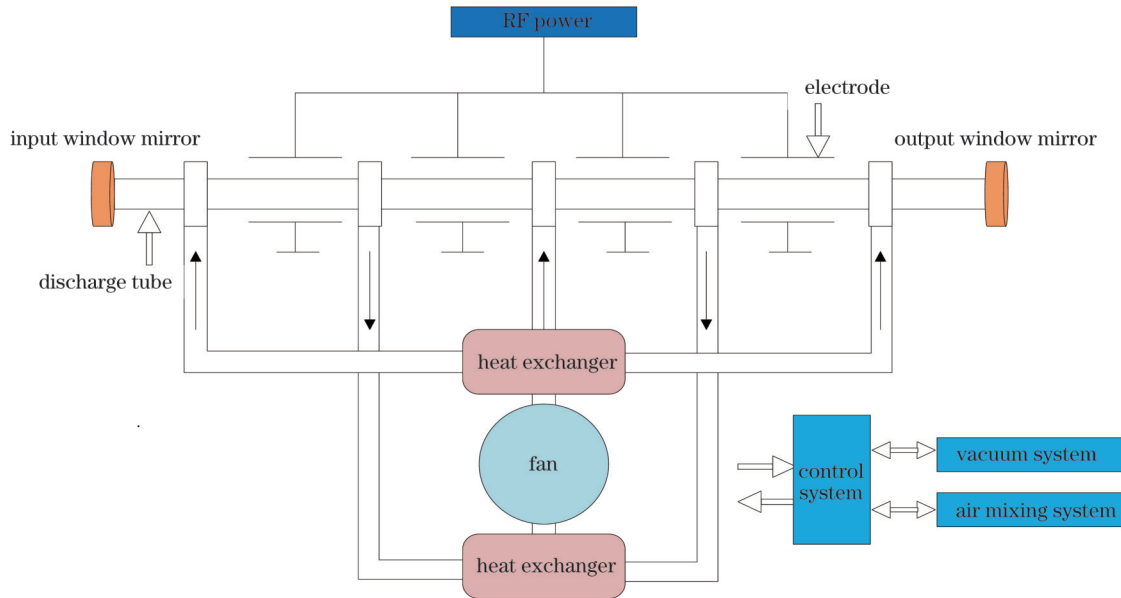


图 4 射频激励快轴流 CO<sub>2</sub> 激光放大器结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of RF excited fast axial flow CO<sub>2</sub> laser amplifier

快轴流 CO<sub>2</sub> 激光放大器的光路如图 5 所示,采用 4 层折叠腔设计,共 32 根放电管,总光程为 18 m,通过更长的光程获得更高的提取效率。

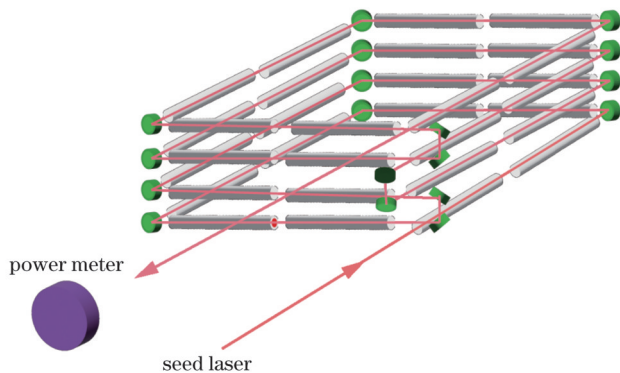


图 5 放大器光路示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the amplifier optical path

具体搭建的实验平台如图 6 所示,其中种子光为波长 10.6 μm、重复频率可调的射频波导脉冲 CO<sub>2</sub> 激光,通过 ZnSe 透镜组成的扩束系统将其扩束 7.5 倍,使得整个光束尽可能充满整个放电管。

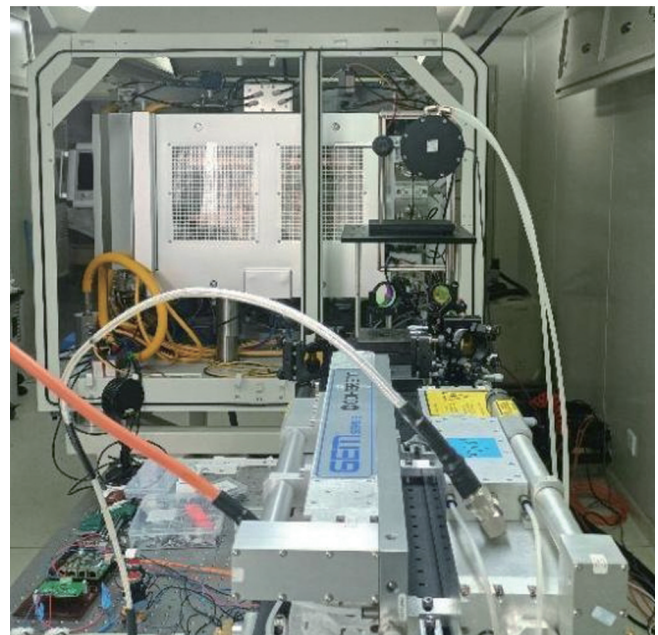


图 6 实验平台

Fig. 6 Experimental platform

### 3 分析与讨论

小信号增益系数是评价激光放大器能力的核心指标,通过对放大器增益能力的仿真可以为提升放大能力提供理论依据和优化方向。本文利用六温度模型,初步寻找放大器最佳工作条件。首先,固定气体体积比  $V(\text{CO}_2):V(\text{N}_2):V(\text{He})=5\%:25\%:70\%$ ,仿真了不同腔压下小信号增益系数随激励电子数密度的变化,如图 7 所示,随着激励电子数密度的增大,小信号增益系数呈现先增长、后稳定、最后缓慢降低的趋势。不同的电子数密度(射频注入功率)对应不同的最佳腔压,激励电子数密度较低时,最佳腔压为 80 mbar,激励电子数密度较高时,最佳腔压为 100 mbar。因此,根据仿真获得的放大器气压、配比等因素对小信号增益的影响,与实验结合,可以得到一个较优的气体比例和气压。

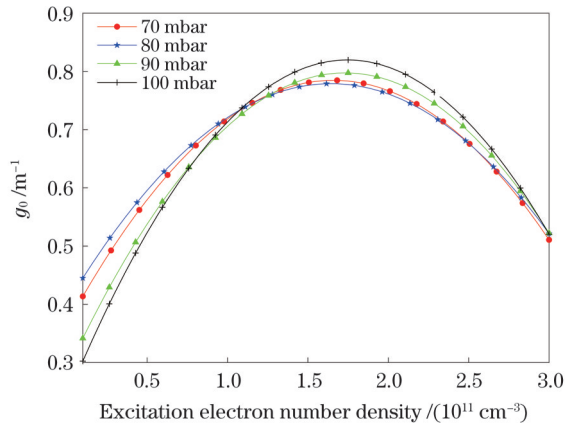


图 7 不同腔压下小信号增益与激励电子密度关系

Fig. 7 Relationship between small signal gain and excitation electron density under different cavity pressures

更进一步地,将稳态解作为初始边界条件,注入脉宽为 150 ns、平均功率为 110 W 的种子脉冲,求得瞬态解,种子与放大输出激光的时域脉冲演化波形如图 8 所示。

相同条件下,脉冲种子放大提取的功率比连续种

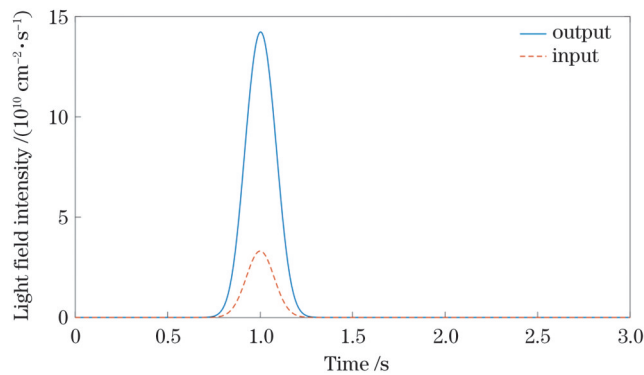


图 8 种子与输出激光的时域脉冲演化波形

Fig. 8 Time-domain pulse evolution waveforms of seed and output lasers

子光低。受限于实验条件,使用种子光为重复频率可调、占空比可调的射频波导脉冲  $\text{CO}_2$  激光,但经过测量,脉冲模式下拖尾较为严重,无相对精准且稳定的脉冲波形。根据六温度模型初步优化得到了一个相对的较优解,实验测得在该工作条件下输出功率为 2504 W。由于实验主要考虑种子占空比 100% 的情况,所以以稳态解求得的小信号增益系数为目标函数,然后通过遗传算法优化后,输出功率达到 3422 W。三种气体气压之和为 80 mbar,气体体积比  $V(\text{CO}_2):V(\text{N}_2):V(\text{He})=12.2\%:15.3\%:72.5\%$ ,优化后的 He 气压接近初始值,  $\text{CO}_2$ 、 $\text{N}_2$  的气压优化值与初始值不同。具体结果如表 4 所示。

表 4 优化前后放大功率对比

Table 4 Comparison of amplification power before and after optimization

Process	$P_{\text{CO}_2}$ / mbar	$P_{\text{N}_2}$ / mbar	$P_{\text{He}}$ / mbar	Laser power / W
Empirical parameter	4.4	17.6	63	2504
Experimental result	9.7	12.2	58	3422

实验中在激光放大器提取了 3200 W 的净激光功率,射频放电注入到放电管内的电功率为 53 kW,光电提取效率为 6.04%。优化后放大功率的提升是因为:  $\text{CO}_2$  含量的上升能够带来更多的反转粒子数,获得更大的增益性能,同时保证了一个最优的占比,因为持续增加  $\text{CO}_2$  比例,  $\text{N}_2$  减少会使得反转粒子的积累变困难。

### 4 结 论

本文证明了通过将遗传算法与六温度模型相结合,可以优化射频激励快轴流  $\text{CO}_2$  激光放大器中的气体压力比与气压,以实现更高的小信号增益,该增益表征为激光放大输出功率。在波长 10.6  $\mu\text{m}$  种子光注入功率 110 W 的情况下,实验中采用经遗传算法优化后的最佳气压比,激光放大输出功率从未优化的激光系统的 2504 W 提高到 3422 W,因此该模型可用于放大器放大性能的提升,对自研放大器的设计和优化起到一定的指导作用。受实验设备所限,目前仅对连续种子放大的工作参数进行了优化,下一步将继续探究脉冲放大的最优参数。

### 参 考 文 献

- [1] 李艳丽,刘显和,伍强.先进光刻技术的发展历程与最新进展[J].激光与光电子学进展,2022,59(9):0922006.  
Li Y L, Liu X H, Wu Q. Evolution and updates of advanced photolithography technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(9): 0922006.
- [2] 宗楠,胡蔚敏,王志敏,等.激光等离子体 13.5 nm 极紫外光刻光源进展[J].中国光学,2020,13(1):28-42.  
Zong N, Hu W M, Wang Z M, et al. Research progress on laser-produced plasma light source for 13.5 nm extreme ultraviolet lithography[J]. Chinese Optics, 2020, 13(1): 28-42.
- [3] Nowak K M, Ohta T, Sugauma T, et al.  $\text{CO}_2$  laser drives

- extreme ultraviolet nano-lithography: second life of mature laser technology[J]. *Opto-Electronics Review*, 2013, 21(4): 345-354.
- [4] 林楠, 杨文河, 陈韞懿, 等. 极紫外光刻光源的研究进展及发展趋势[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(9): 0922002.
- Lin N, Yang W H, Chen Y Y, et al. Research progress and development trend of extreme ultraviolet lithography source[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(9): 0922002.
- [5] Shi B N, Li J T, Ye S, et al. Modified Frantz-Nodvik equation and numerical simulation of a high-power Innoslab picosecond laser amplifier[J]. *Optics Express*, 2022, 30(7): 11026-11035.
- [6] Lebedev Y A, Shakhatov V A. The rate constant of electron impact dissociation of carbon dioxide (analytical review of calculation methods and known results) [J]. *High Energy Chemistry*, 2021, 55(6): 419-435.
- [7] Sazhin S, Wild P, Leys C, et al. The three temperature model for the fast-axial-flow CO<sub>2</sub> laser[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1993, 26(11): 1872-1883.
- [8] Smith K, Thomson R M. *Computer modeling of gas lasers*[M]. Boston: Springer, 1978.
- [9] Jelvani S, Koushki A M. Optimization of gas pressures ratio in a fast-axial-flow CO<sub>2</sub> laser with genetic algorithm[J]. *Optik*, 2012, 123(16): 1421-1424.
- [10] 郑晓钊, 姚纪阳, 李华军, 等. 基于遗传算法的光学层析成像的结构优化[J]. *光学学报*, 2023, 43(3): 0311001.
- Zheng X Z, Yao J Y, Li H J, et al. Configuration optimization of optical tomography based on genetic algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(3): 0311001.
- [11] 叶静涵, 朱子任, 白进周, 等. 高气压同位素 CO<sub>2</sub> 皮秒激光脉冲放大输出特性理论研究[J]. *中国激光*, 2023, 50(11): 1101017.
- Ye J H, Zhu Z R, Bai J Z, et al. Theoretical research on output characteristics of high-pressure isotope CO<sub>2</sub> picosecond pulse laser amplification[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(11): 1101017.
- [12] Soukieh M, Abdul Ghani B, Hammadi M. Mathematical modeling of CO<sub>2</sub> TEA laser[J]. *Optics & Laser Technology*, 1998, 30(8): 451-457.
- [13] 张冉冉. 短脉冲 CO<sub>2</sub> 激光放大与噪声光隔离技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2021.
- Zhang R R. Research on short pulse CO<sub>2</sub> laser amplification and noise light isolation technology[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2021.
- [14] Adineh V R, Aghanajafi C, Dehghan G H, et al. Optimization of the operational parameters in a fast axial flow CW CO<sub>2</sub> laser using artificial neural networks and genetic algorithms[J]. *Optics Laser Technology*, 2008, 40(8): 1000-1007.

## Optimization of Fast Axial Flow CO<sub>2</sub> Laser Amplifier Parameters Based on Genetic Algorithm

You Cong<sup>1</sup>, Huang Wei<sup>1</sup>, Lin Gaojie<sup>1</sup>, Li Bo<sup>1\*</sup>, Zhao Jiang<sup>2</sup>, Hu Youyou<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*School of Optics and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China;*

<sup>2</sup>*School of Microelectronics, Hubei University, Wuhan 430062, Hubei, China;*

<sup>3</sup>*College of Science, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, Jiangsu, China*

### Abstract

**Objective** The mainstream approach for obtaining a 13.5 nm extreme ultraviolet (EUV) lithography light source involves laser-excited plasma. This requires the use of a high-power, high-frequency, and high-beam-quality short-pulse CO<sub>2</sub> laser, as well as a droplet Sn target, to generate extreme ultraviolet light. To satisfy the power requirements of EUV lithography, a high-frequency CO<sub>2</sub> oscillator must be used to generate high-frequency CO<sub>2</sub> seeds. These seeds undergo multi-stage amplification to produce a high-power CO<sub>2</sub> laser that serves as the driving laser. Consequently, a power amplifier is the core device for driving a light source system. Therefore, this study aims to optimize the operating parameters of a radio frequency (RF)-excited fast axial-flow CO<sub>2</sub> laser power amplifier to achieve better gain performance and higher amplified output power. This optimization has significant practical significance for efficiently obtaining EUV light sources.

**Methods** Generally, the output power of an RF-excited fast axial laser amplifier is intricately linked to several factors such as the seed optical power, gas composition ratio, RF injection power, discharge tube diameter, gas pressure, and flow rate. In this paper, we establish a six-temperature model for an RF-excited fast axial CO<sub>2</sub> laser amplifier. This model encompasses the most abundant energy levels for simulating and calculating steady-state and transient energy distributions, light intensity changes, gain coefficients, etc. in the amplification process. As optimizing a single parameter with a six-temperature model may result in local optimization and a considerable workload, we employ a global optimization approach for the amplifier. Multiple parameters of the amplifier are optimized simultaneously. Thus, a six-temperature model serves as the fitness function, and a genetic algorithm is applied to globally optimize the cavity pressure and gas pressure ratio of CO<sub>2</sub>:N<sub>2</sub>:He in a self-developed RF-excited fast axial CO<sub>2</sub> laser amplifier. Furthermore, by continuously adjusting the relevant parameters of the genetic algorithm, we obtain optimized results. Finally, the feasibility of this approach is confirmed through amplification experiments performed on an experimental platform.

**Results and Discussions** In this study, a six-temperature model is employed to identify the optimal operating conditions for the amplifier. Initially, a fixed V(CO<sub>2</sub>):V(N<sub>2</sub>):V(He)=5%:25%:70% is used to simulate the changes in the small-signal gain coefficients with the excitation electron number density under varying cavity pressures. The results indicate that the small-signal gain coefficients exhibit a pattern of increasing, stabilizing, and then gradually decreasing with increasing excitation electron number density. Different

electron number densities (corresponding to the RF injection power) result in distinct optimal cavity pressures, with optima of 80 mbar (1 bar=100 kPa) and 100 mbar for a lower and higher excitation electron number density, respectively (Fig. 7). Based on the simulation results, an optimal gas ratio and gas pressure are determined, considering the impact of the amplifier gas pressure and ratio on the small-signal gain and incorporating experimental data. Subsequently, the steady-state solution is used as the initial boundary condition, and a seed pulse with a pulse width of 150 ns and an average power of 110 W is injected to obtain the transient solution. This involves capturing the time-domain pulse evolution waveforms of both the seed and amplified output lasers (Fig. 8). Based on the preliminary optimization results from the six-temperature model, a relatively optimal solution is obtained, resulting in an output power measurement of 2504 W under the operating conditions. As the experiment primarily considers the scenario of a 100% duty cycle for the seed, the small-signal gain coefficients derived from the steady-state solution serve as the objective function. After optimization using a genetic algorithm, the output power increases to 3422 W. The sum of the three gas pressures is 80 mbar, and the gas  $V(\text{CO}_2):V(\text{N}_2):V(\text{He})=12.2\%:15.3\%:72.5\%$ . Notably, the optimized He gas pressure corresponds closely with the initial value, whereas the optimized  $\text{CO}_2$  and  $\text{N}_2$  gas pressures differ from the initial values. This validates the feasibility and effectiveness of the proposed method (Table 4).

**Conclusions** In this study, we optimize the gas pressure ratio and barometric pressure in an RF-excited fast axial  $\text{CO}_2$  laser amplifier by integrating a genetic algorithm with a six-temperature model. This optimization aims to achieve a higher small-signal gain, as indicated by the laser-amplified output power. In experiments injecting a  $10.6\ \mu\text{m}$  seed with 110 W using the gas pressure ratio optimized through the genetic algorithm, the laser amplified output power significantly increases from 2504 W in the unoptimized laser system to 3422 W. This model is valuable for enhancing the amplifier performance and offers practical guidance for designing and optimizing internally developed amplifiers. Owing to equipment constraints, the current optimization has focused on continuous seed amplification parameters, with further exploration planned for the optimal parameters in pulse amplification.

**Key words** laser technology; extreme ultraviolet;  $\text{CO}_2$  laser amplification; six-temperature model; genetic algorithm