

# 基于人工智能算法的宽稳区大模场纳秒激光产生\*

李晶宇<sup>1)2)</sup> 杨晶<sup>1)3)†</sup> 王浩<sup>1)2)</sup> 李雪鹏<sup>1)2)</sup> 宁梓豪<sup>1)3)</sup>  
高宏伟<sup>1)</sup> 王小军<sup>1)2)</sup> 赵天卓<sup>1)</sup> 樊仲维<sup>1)3)</sup> 许祖彦<sup>1)2)</sup>

1) (中国科学院大学, 北京 100049)

2) (中国科学院理化技术研究所, 中国科学院功能晶体与激光技术重点实验室, 北京 100190)

3) (中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094)

(2025年4月22日收到; 2025年6月6日收到修改稿)

本文基于人工智能算法提出了一种宽稳区大模场激光振荡器的优化设计方法. 通过构建谐振腔的光场传播模型, 设计了多目标优化函数, 并利用人工智能算法对腔段长度、透镜焦距及高斯镜选型多个维度进行全局优化. 在设定的热焦距范围内, 本文对模拟退火、粒子群优化和遗传算法等多种算法进行对比, 最终实现了复杂多维参数空间中最优解的高效搜索. 经过实验验证, 优化后的谐振腔在长度为 540 mm 的腔长范围内实现了 100 Hz 和 190 mJ, 光束质量为  $M_x^2 = 2.1$ ,  $M_y^2 = 1.9$  的 7 ns 脉宽的激光输出. 优化后的谐振腔热稳定曲线在大模场运转区间的斜率显著变缓, 有效扩大了谐振腔的热稳区, 从而保障了高重复频率激光器的稳定运行. 该研究有望为宽稳区大模场纳秒激光振荡器的设计提供参考.

**关键词:** 固体激光, 大模场, 人工智能, 多参量优化

**PACS:** 42.55.Rz, 42.60.Jf

**DOI:** 10.7498/aps.74.20250519

**CSTR:** 32037.14.aps.74.20250519

## 1 引言

激光二极管 (laser diode, LD) 侧泵 Nd:YAG 振荡器因其结构简洁、光束质量优良、单脉冲能量较大等优势, 成为多级光放大器 (master oscillator power amplifier, MOPA) 系统中的关键组成部分, 在大能量激光应用中展现出广泛的应用前景<sup>[1,2]</sup>. 尤其在空间通信、地月测距等领域, 随着对紧凑型大能量激光器需求的日益增加, LD 侧泵 Nd:YAG 振荡器已逐渐成为满足该需求的理想选择<sup>[3-5]</sup>. 中国科学院上海光学精密机械研究所采用平面高反镜和平面输出耦合器的紧凑型结构, 得到了 100 Hz, 50 mJ 的激光输出<sup>[6]</sup>. 大模场激光器 (large mode

area, LMA) 在大能量脉冲激光系统中具有重要应用, 因其能在保持良好光束质量的同时, 提供更高重频和更大的输出能量<sup>[7,8]</sup>. 但在基于稳定谐振腔的设计中, 基模半径一般不超过 1 mm, 这极大地制约了模场体积和输出能量<sup>[9,10]</sup>. 为了获取更大的基模体积, 激光器的工作点通常选择在热近非稳区. 但此时基模尺寸对泵浦功率的变化非常敏感, 需要在采用更高稳定的主被动方案来确保稳定输出<sup>[11,12]</sup>.

与稳腔激光器不同, 非稳腔激光器因其光束在腔镜作用下不断展宽, 最终可填充整个增益区域, 易于得到大模场输出<sup>[13]</sup>, 但其应用仍受到一定限制. 首先, 非稳腔的输出耦合镜存在的硬边光阑衍射效应会影响输出光束质量. 此外, 输出光场近、

\* 国家重点研发计划 (批准号: 2024YFB4608400, 2023YFF1303603) 和广东省“璀璨行动”重大装备及应用项目 (批准号: CC/ZN-202402ZJ0301) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yangjing02@aircas.ac.cn

远场分布的差异性也进一步限制了应用场景. 为了得到更大的基模体积, 并优化光束质量和提取效率, 高斯镜非稳腔的设计被研究人员所青睐. Liu 等<sup>[14]</sup>设计了一种非稳腔技术方案, 在 100 Hz 重复频率下, 得到了 388 mJ, 脉冲宽度为 15 ns, 光束质量  $M_x^2 = 3.2$ ,  $M_y^2 = 2.8$  的结果. Li 等<sup>[2]</sup>报道了一种大能量纳秒 MOPA 激光器, 该系统也采用了高斯镜非稳腔的设计, 在 50 Hz 的重复频率下, 单脉冲能量为 180 mJ. 其近场光斑呈现超高斯平顶分布. 2024 年韩昌昊等<sup>[15]</sup>设计了由 20 个 bar 条串联的侧面泵浦结构, 仍然采用高斯镜非稳腔的结构在 100 Hz 重复频率下, 实现了 1064 nm 激光输出, 单脉冲能量 496 mJ, 光束质量优于  $9 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ . 通常, 为实现大的基模体积, 研究人员不得不增大腔长并选择更大的放大倍率. 这种设计虽然有助于实现高的空间匹配, 提升输出能量, 却往往导致激光器的尺寸变得不够紧凑. 此外, 高斯镜设计对于失谐的敏感性较高, 这使得系统在实际应用中面临更大的稳定性挑战<sup>[16]</sup>. 随着人工智能算法的不断发展, 为激光器的结构优化和参数设计提供了新的

思路<sup>[17-20]</sup>.

本文提出了一种基于人工智能算法的一种宽稳区大模场纳秒激光振荡器设计方法, 综合考虑模场体积、放大倍率以及腔长紧凑性等因素. 通过优化设计参数和结构布局, 借助算法寻优的能力设计了谐振腔, 并通过高斯光束理论分析了谐振腔的有效性, 最后经过实验, 验证了激光器的整体性能和适用性. 这可能为后续复杂激光系统的设计提供借鉴和思路.

## 2 振荡器的光学传播模型

在大能量激光振荡器中, 高斯镜主要作为耦合输出器, 其反射率为

$$R(r) = R(0) \exp \left[ -2 \left( \frac{r}{\omega_m} \right)^2 \right], \quad (1)$$

其中,  $R(0)$  是高斯镜中心的峰值反射率,  $\omega_m$  为高斯镜的膜斑半径, 即反射率降为峰值反射率的  $1/e^2$  时的半径.

根据图 1 所示的光路, 首先构建谐振腔的矩阵光学模型, 光学谐振腔的往返矩阵为

$$\begin{aligned} M = & \begin{bmatrix} 1 & l \\ 0 & \frac{l}{2n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & x_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & x_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R_c} & 1 \end{bmatrix} \mathbb{F} \begin{bmatrix} 1 & x_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\ & \times \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & x_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \frac{l}{2n} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_t} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \frac{l}{2n} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\ & \times \begin{bmatrix} 1 & x_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R_{c-GM}} - i \frac{\lambda}{\pi \omega_m^2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & x_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \frac{l}{2n} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_t} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}. \quad (2) \end{aligned}$$

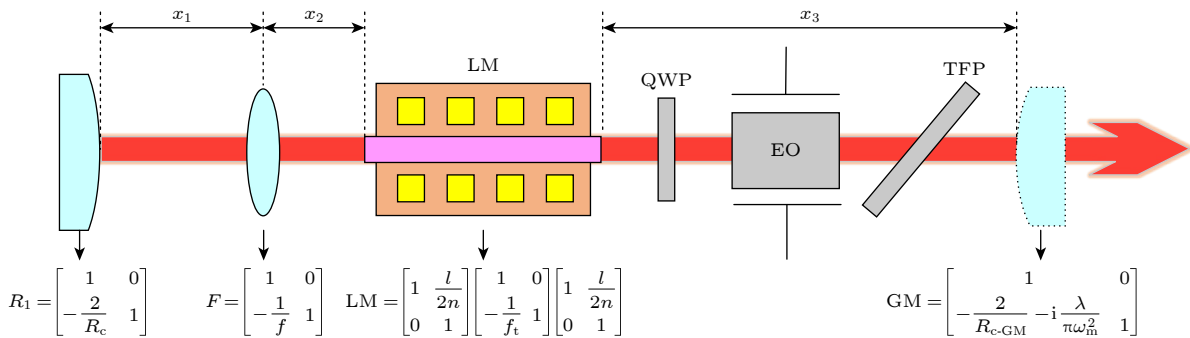


图 1 高斯镜非稳腔的优化示意图

Fig. 1. Optimization environment for Gaussian mirror unstable cavities.

根据高斯光束的传播定律, 当光束经由光腔中各元件往返传输后形成自再现光场分布, 即高斯光束在高斯镜上的本征解:

$$q = \frac{Aq + B}{Cq + D}, \quad (3)$$

其中,  $q$  参数定义为  $\frac{1}{q} = \frac{1}{R} - i\frac{\lambda}{\pi\omega^2}$ , 代入 (3) 式可以解得

$$\frac{1}{q} = \frac{D - A}{2B} - i\frac{\sqrt{4 - (A + D)^2}}{2B}. \quad (4)$$

据此可以计算激光晶体中心的束宽. 根据实验室的现有条件, 腔镜为一个固定曲率半径  $R_c$  为 -1000 mm 的高反凸面镜, 高斯镜有 3 种, 参数列于表 1.

表 1 高斯镜规格参数  
Table 1. Specifications of Gaussian mirrors.

高斯镜编号 $N$	曲率半径 $R_c/\text{mm}$	中心反射率	膜斑半径 $\omega_m/\text{mm}$
1	-700	0.35	4
2	-1500	0.3	3
3	-2000	0.2	2

为了补偿激光晶体的热透镜效应并优化谐振腔中的模式扩展, 本文在设计中引入焦距可调透镜进行补偿调节, 透镜焦距范围设定为 -1000—1000 mm.

### 3 目标函数和优化策略

定义光学谐振腔的优化函数  $J$ , 目标是通过将  $J$  最小化, 从而得到与各控制参数与谐振腔特征参数预设量最小偏离, 函数定义如下:

$$\min J = \sum_{i=1}^3 C_i \cdot a_i, \quad (5)$$

式中,  $a_1 = |\omega - \omega_t|$  反应谐振腔中的光斑尺寸,  $\omega_t$  为期望的光斑尺寸, 取绝对值即束宽越接近目标值, 第 1 项值越小则越接近预设的大模场尺寸.  $a_2 = |R(0)M^2 - 1|$  为高斯镜非稳腔的平顶条件 [21],  $R(0)$  为高斯镜的峰值反射率,  $M$  为该光学谐振腔的往返放大倍率, 通过计算谐振腔中的光场分布得到, 第 2 项越小, 表明高斯镜上的透射光斑越接近平顶分布; 第 3 项则代表光学谐振腔长度, 该长度由三部分长度求和得到  $a_3 = x_1 + x_2 + x_3$ ,  $x_1$  为高反镜到预留透镜的距离,  $x_2$  为预留透镜到激光晶体的距离,  $x_3$  为激光晶体到高斯镜耦合输出器的

距离. 考虑到谐振腔的紧凑性, 三者之和越小越好.  $C_1, C_2, C_3$  为权重系数, 用于调节各因子对优化目标的影响. 为了优化的距离结果具备现实操作的可能性,  $x_1 - x_3$  的取值范围设为 50—1000 mm. 需要特别提到的是,  $\omega$  和  $M$  由腔内光学距离、腔镜  $R_c$ 、腔内透镜  $f$  和高斯镜参数  $R_{c-GM}$  和  $\omega_m$  决定.

将  $J$  作为优化目标函数, 分别使用模拟退火算法 [22]、粒子群优化算法 [23] 和遗传算法 [24], 来寻找目标函数最小值时的谐振腔参数, 即优化  $x_1, x_2, x_3, f$  以及高斯镜编号  $N$  这 5 个参数. 优化收敛曲线如图 2 所示. 图 2(a) 为模拟退火的优化过程. 可以看出模拟退火算法的初始目标函数值最小, 而且优化速度最快, 这是因为算法效果依赖先验知识, 人为地给出了一个较好的腔型初始值. 粒子群优化算法收敛曲线下降也非常迅速, 在经历了一个小幅波动后, 目标函数的值稳定在 0.92. 图 2(b) 表明遗传算法的收敛最慢, 但最终达到了最好的全局最优解 0.91.

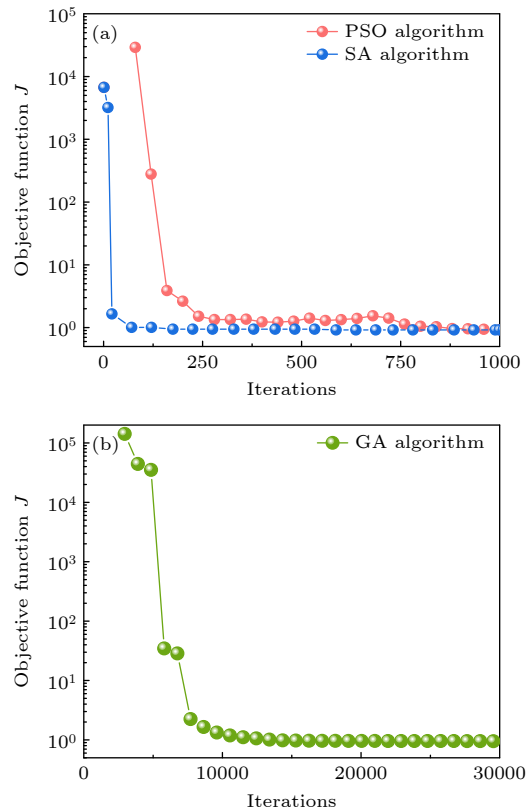


图 2 不同优化算法在迭代过程中的收敛曲线 (a) 模拟退火算法和粒子群优化算法; (b) 遗传算法

Fig. 2. Convergence curves of different optimization algorithms: (a) Simulated annealing algorithm and particle swarm optimization algorithm; (b) genetic algorithm.

#### 4 优化设计与讨论

由于遗传算法最终解的质量相对更好, 本文后续优化算法的讨论将集中在遗传算法的框架中展开. 首先生成一个包含针对 5 个参数的 1000 组不同参数的种群, 这些参数代表着不同的谐振腔设计. 每个谐振腔的设计由一组决策变量表示, 包括光学元件的距离  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ , 透镜焦距  $f$  以及高斯镜的编号  $N$ , 对应的组合高达  $5.14 \times 10^{12}$  种. 针对每个腔型, 通过计算目标函数值来评估其性能. 目标函数被设计为综合考虑谐振腔的本征模式尺寸接近预设目标值, 接近高斯镜平顶条件以及紧凑的腔长. 值越小的目标函数表明腔型设计越符合期望. 通过目标函数评估后, 选择适应度较高的腔型, 即目标函数值较小的腔型, 并按 50% 比例保留它们进入下一代. 这些选中的腔型将通过交叉操作生成新的候选设计, 这些操作模仿了自然界中的遗传进化过程, 从而产生多样化的后代. 交叉操作使得父代的不同设计参数互换, 探索更广阔的设计空

间. 在遗传算法的每一代中, 会通过选择、交叉和变异等操作逐步提高种群的整体适应度. 每一代都会重新计算每个腔型的目标函数值, 并根据适应度选择下一代的种群. 经过 2000 次迭代, 最终获得一组参数, 使得谐振腔的性能收敛到期望的设计范围内, 从而认为优化过程完成. 这个过程的核心思想是通过模拟自然选择和遗传机制, 逐步逼近理想的谐振腔设计, 优化参数的同时满足物理约束条件和性能要求.

考虑到所用电光晶体有效口径为 4.7 mm, 激光晶体为  $\Phi 8 \times 190$  mm 的 Nd:YAG 晶体, 掺杂浓度为 0.6%<sup>[25]</sup>. 将谐振腔基模半径的目标值设为 2.2 mm. 取  $C_1=1$ ,  $C_2=2.5 \times 10^{-3}$ ,  $C_3=1 \times 10^{-3}$ . 遗传算法的种群规模设置为 1000, 最大进化数为 2000, 这样可以一次迭代  $2 \times 10^6$  次不同的腔型. 如图 3 所示, 腔段长度  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  的优化范围均为 50—1000 mm, 在前 15 次迭代中, 3 段长度均有明显变化, 随后逐步收敛, 分别为  $x_1 = 50$  mm,  $x_2 = 50$  mm,  $x_3 = 250$  mm. 最终总腔长为 540 mm.

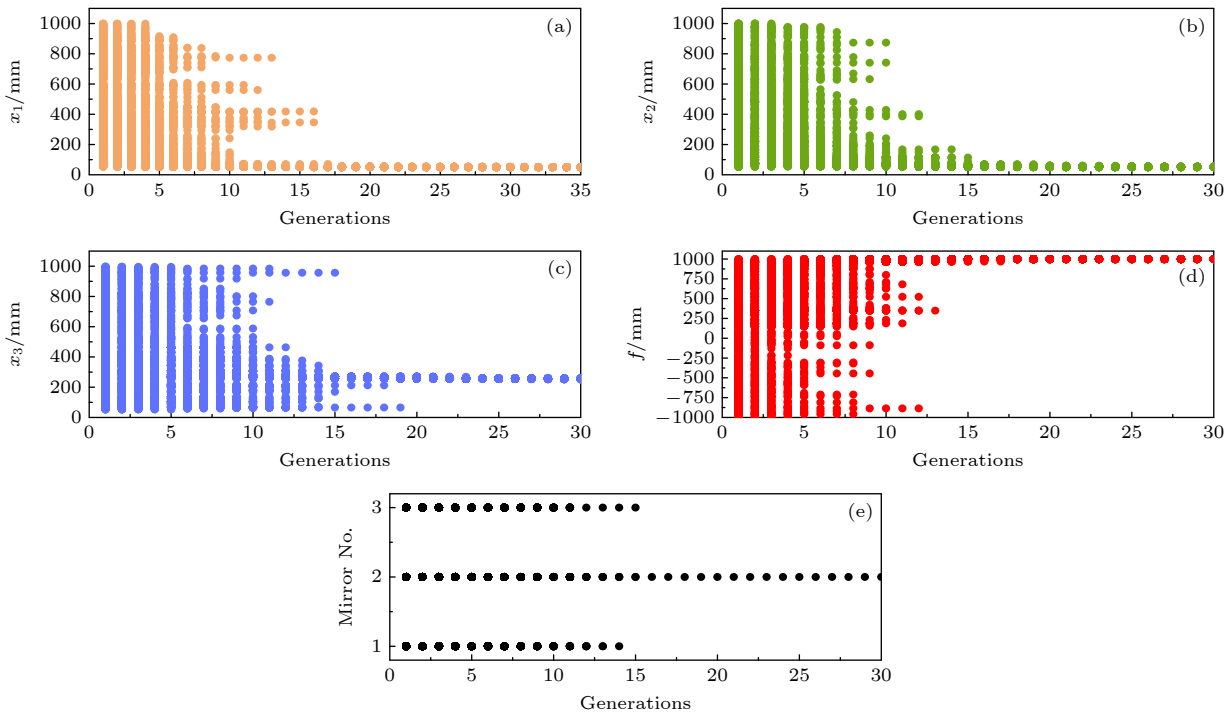


图 3 基于遗传算法的谐振腔参数优化过程 (a) 腔段长度  $x_1$  随进化代数的变化; (b) 腔段长度  $x_2$  随进化代数的变化; (c) 腔段长度  $x_3$  随进化代数的变化; (d) 可调透镜焦距  $f$  的优化轨迹; (e) 光学参数组 ( $w_m, R_0, R_c$ ) 选择随代数的演化, 算法在 20 代后趋于稳定, 最终选定参数组 2 ( $w_m = 3$  mm,  $R_c = -1500$  mm,  $R_0 = 0.3$ ).

Fig. 3. Optimization process of resonator parameters via genetic algorithm: (a) Evolution of cavity segment  $x_1$ ; (b) evolution of cavity segment  $x_2$ ; (c) evolution of cavity segment  $x_3$ ; (d) optimization trajectory of adjustable lens focal length  $f$ ; (e) selection of optical parameter groups ( $w_m, R_0, R_c$ ) across generations, the algorithm converges after 20 generations, ultimately selecting parameter group 2 ( $w_m = 3$  mm,  $R_c = -1500$  mm,  $R_0 = 0.3$ ).

透镜焦距  $f$  在初期探索阶段剧烈变化, 在第 12 代左右收敛至  $f = 1000$  mm. 受限于可选的规格, 高斯镜的选取被认为是一种离散动作, 初期在 3 种不同参数 (表 1) 的高斯镜中进行尝试, 最终收敛至 2 号高斯镜, 即曲率半径为  $-1500$  mm, 中心反射率为 0.3, 膜斑半径为 3 mm.

图 4 为算法优化后的 Nd:YAG 棒激光器的示意图. 该谐振腔由以下组件组成: 高度反射的凸面后镜 M、输出耦合镜 OC (编号 2 高斯镜)、侧面泵浦 Nd:YAG 激光模块 LM、1/4 波片 QWP、Q 开关、薄膜偏振片 TFP (1064 nm) 和平凸透镜 L. 在本实验室中, 采用具有 4.7 mm 有效孔径的 BBO 晶体作为系统中的 Q 开关. TFP 用于在激光谐振腔内分离偏振状态, 反射 p 偏振光并透射 s 偏振光. QWP 被调整至 1/4 波片位置. 电光调制器在 100 Hz 频率下以 4000 V 驱动电压进行激励. Q 开关操作的时序经过精确同步, 以优化脉冲生成效果.

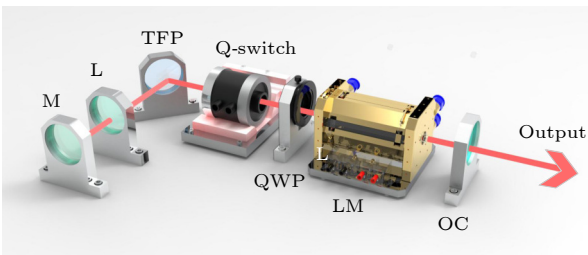


图 4 实验装置示意图. M 为高反射后镜, L 为平凸透镜, TFP 为 1064 nm 薄膜偏振片, QWP 为 1/4 波片, LM 为激光模块, OC 为输出耦合镜

Fig. 4. Experimental setup. M represents high-reflectivity rear mirror, L represents plano-convex lens, TFP represents thin-film polarizer at 1064 nm, QWP represents quarter-wave plate, LM represents laser module, OC represents output coupler.

图 5 绘制了该优化结果下谐振腔内各平面的束宽半径和高斯镜上的输出光场, 此时谐振腔腔长为 540 mm. 针对本文提出的算法所得到优化腔型, 分别计算并绘制了 OC 为高斯镜和非高斯镜时谐振腔的热焦距稳区图. 如图 6 所示, 当热焦距在 250—1700 mm 这个范围内时, OC 是否为高斯镜对谐振腔的稳区无明显影响, 通常激光器的工作点选择在热近非稳区<sup>[11]</sup>, 以提高模体积. 此时腔内的放大倍数接近 1, 同时腔内基模体积较小, 未超过稳定腔中光斑尺寸为 1.1 mm 的限制<sup>[9]</sup>, 而高斯镜的有效半径为 3 mm, 因此大部分能量仍然被高斯

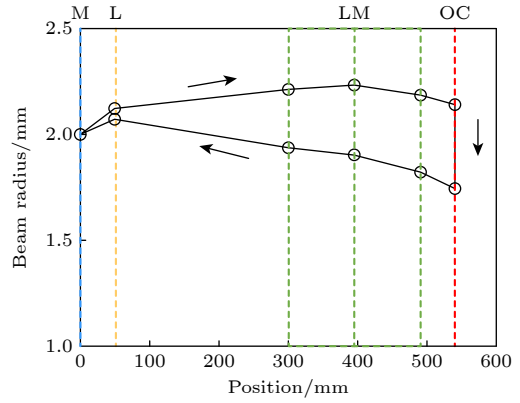


图 5 谐振腔内各平面束宽半径分布. M 为高反镜, L 为透镜, LM 为激光模块, OC 为高斯耦合输出镜

Fig. 5. Beam radius distribution at different planes within the resonator. M represents high-reflectivity mirror, L represents lens, LM represents laser module, OC represents Gaussian mirror output coupler.

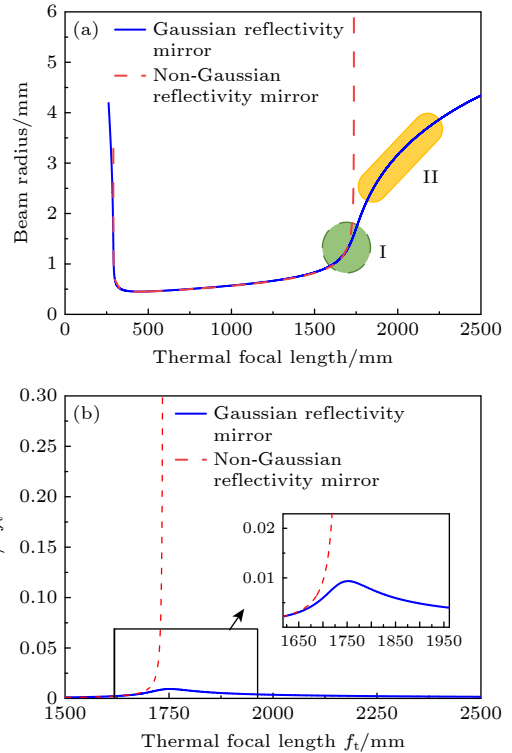


图 6 (a) 晶体中心位置基模光斑半径与热焦距的关系, 其中红虚线 OC 为非高斯镜, 蓝实线 OC 为高斯镜, I 为传统热近非稳区, II 为高斯镜非稳区; (b) 不同耦合输出器下, 谐振腔模场半径  $\omega$  对焦距  $f_t$  的导数变化趋势

Fig. 6. (a) Relationship between the fundamental mode beam radius at the crystal center and the thermal focal length, red dashed line OC as a non-Gaussian mirror, blue solid line OC as a Gaussian mirror, I represents traditional thermal near-unstable region, II represents Gaussian mirror unstable region; (b) the derivative of the resonator mode radius  $\omega$  with respect to focal length  $f_t$  under different output couplers.

镜中心高反射率的部分反射留在腔内. 在热焦距超过 1700 mm 后, 高斯镜的作用被凸显出来. 由于高斯镜的传播矩阵为

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R} - i\frac{\lambda}{\pi\omega_m^2} & 1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

其中,  $-\frac{2}{R}$  可以视为高斯镜对光束的曲率影响项,  $-i\frac{\lambda}{\pi\omega_m^2}$  为高斯镜对光束的模场约束项. 此时, 仅考虑高斯镜对光束的模场约束作用, 假设高斯镜的曲率半径  $R \rightarrow \infty$ , 则传播矩阵可简化为

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -i\frac{\lambda}{\pi\omega_m^2} & 1 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

根据高斯光束的传播性质, 当光束经高斯镜反射时, 入射光束  $q_i$  与反射光束  $q_r$  的关系为

$$q_r = \frac{Aq_i + B}{Cq_i + D}, \quad (8)$$

代入  $A, B, C, D$  各项, 得到:

$$\frac{1}{q_r} = \frac{1}{q_i} - i\frac{\lambda}{\pi\omega_m^2}. \quad (9)$$

为了简化推导, 假设入射光的波前曲率半径  $R_i \rightarrow \infty$ , 即  $q_i = i\frac{\pi\omega_i^2}{\lambda}$ . 代入 (9) 式可得

$$\frac{1}{\omega_r^2} = \frac{1}{\omega_i^2} + \frac{1}{\omega_m^2}, \quad (10)$$

其中,  $\omega_i$  为高斯镜上入射光束的半径,  $\omega_m$  为高斯镜的膜斑半径,  $\omega_r$  为高斯镜上反射光束的半径. 从推导关系可以看出, 高斯镜的引入使高斯光束的束宽发生了明显收缩, 光束的半径从 2.2 mm 缩小至 1.7 mm. 这种束宽的突变压缩使得在非稳腔结构中, 光束行为不同于普通镜片反射后的自然发散趋势. 相反, 反射后的光束束宽始终小于入射束宽, 从而使谐振腔稳区曲线的后半段趋于平缓并具备更好的调控能力. 如图 6(b) 所示, 绘制了在不同耦合输出器下, 谐振腔模场半径  $\omega$  对焦距  $f_t$  的导数变化趋势用于评估腔模尺寸对焦距变化的敏感性, 蓝线所代表的高斯镜非稳腔中的腔膜尺寸明显更加平稳, 表明其不会因热焦距的变化而发生剧烈变化. 可见, 高斯镜耦合输出器有助于更有效地约束腔内模式, 使得更多的增益区域被有效利用, 从而提升了增益介质中可提取的激光能量.

此外, 工作点落在较长的热焦距一侧, 意味着激光模块产热更少, 当电光调  $Q$  运转时, 可以避免偏振光因透过晶体而导致热退偏. 而在热焦距小于 250 mm 时, 并且考虑到本节的激光模块的热焦距并不能达到这个范围, 因此无法选取有效的工作点.

为了探究不同优化目标函数对腔型设计的影响, 在不含  $Q$  开关的光路中, 分别设置了  $\omega_t = 0.7, 1.2, 2.2, 3.2$  mm 的优化目标函数, 借助本算法可以快速得到多种不同基模尺寸的谐振腔设计. 如图 7 所示, 绘制了不同腔型情况下基模直径和输出功率的关系, 更大的基模尺寸对应着更高的输出功率.

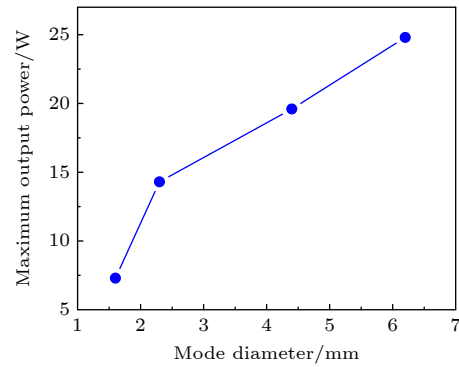


图 7 不同腔型的模式直径与最高输出功率关系图

Fig. 7. Mode diameter vs. maximum output power for different cavity types.

## 5 实验结果与验证

为了评估在振荡器在 100 Hz 重复频率准连续下的性能, 图 8(a) 为输出能量与泵浦能量之间的关系. 激光增益模块中的 LD 为准连续电源驱动, 输入参数为 100 Hz, 230  $\mu$ s 泵浦脉宽, 输出能量水平由能量计 (PE50 BF-C, Ophir) 进行测量. 输出能量与泵浦能量呈近似线性关系. 时域特性由光电二极管和数字示波器进行监测, 当电光调  $Q$  器件运转时, 输出纳秒脉冲激光如图 9 所示, 脉冲宽度约为 7 ns. 在泵浦能量为 1.1 J 时, 激光输出 190 mJ 的能量, 光光转换效率 (O-O 效率) 为 17%. 此外, 在测试的最高泵浦能量下未观察到功率饱和 (power saturation) 或热翻转 (thermal rollover), 这表明通过进一步提高泵浦能量, 可以实现更高的输出能量. 图 8(b) 为 60 min 内的能量稳定性测量, 结果显示能量波动为 1.80 (标准差).

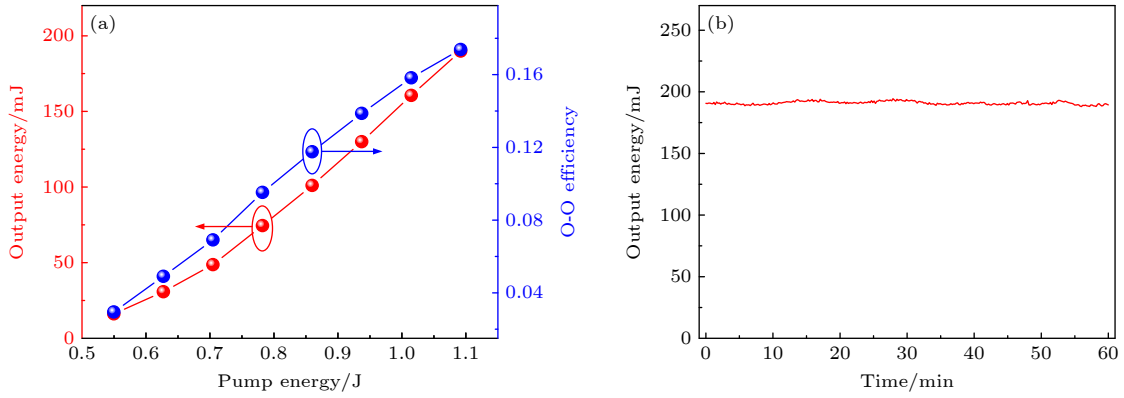


图 8 (a) 输出能量与泵浦能量的关系及光光转换效率; (b) 输出稳定性在 60 min 内的测量结果

Fig. 8. (a) Output energy and O-O efficiency as a function of pump energy; (b) output stability measurement over 60 min.

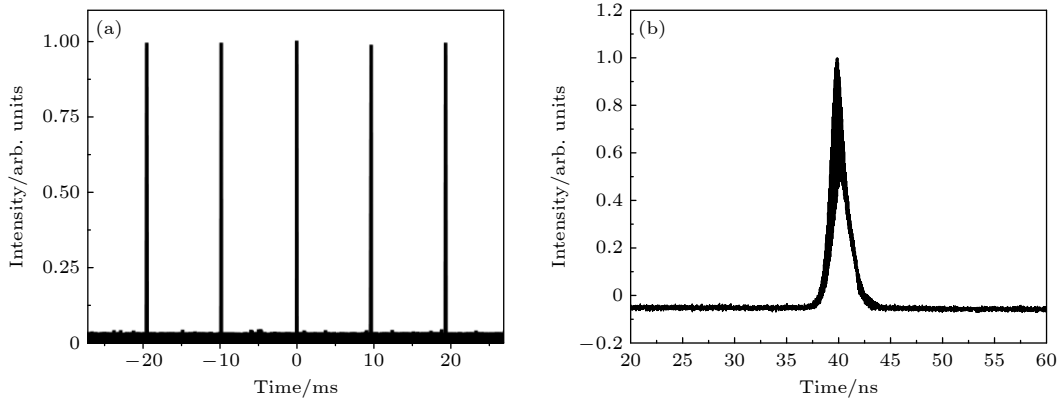


图 9 (a) 激光的典型脉冲列; (b) 单个脉冲的扩展轮廓

Fig. 9. (a) Typical pulse train of laser; (b) an expanded single pulse profile.

输出激光束质量因子通过光束分析仪 (Gen-tecElectro-Optics, BEAMAGE-M2) 在满输出能量下测量. 图 10 为光束的焦线以及相应的拟合结果, 得出的光束质量值在  $x$  轴方向上为 2.1, 在  $y$  轴

方向上为 1.9. 图 10 插图为二维空间激光束强度分布, 表明激光束具有近乎平顶的分布.

## 6 总结

本文提出了一种基于人工智能算法的宽稳区大模场纳秒激光振荡器优化设计方法, 通过构建谐振腔的光场传播模型和设计多参量优化函数, 利用模拟退火算法、粒子群优化算法和遗传算法对腔段长度、透镜焦距及高斯镜选型等多维度参数进行全局优化. 实验结果表明, 优化后的谐振腔在 100 Hz 重复频率下, 输出了 190 mJ 能量、7 ns 脉宽的激光, 光束质量因子在  $x$  轴方向为 2.1,  $y$  轴方向为 1.9. 仿真结果显示, 优化后的谐振腔在大模场段的热稳区曲线斜率大幅减缓, 有效扩大了热稳区, 提高了高重复频率激光器的稳定性. 该研究为宽稳区大模场纳秒激光振荡器的设计提供了新的思路和方法, 有望提升激光器设计效率, 推动高性能激光

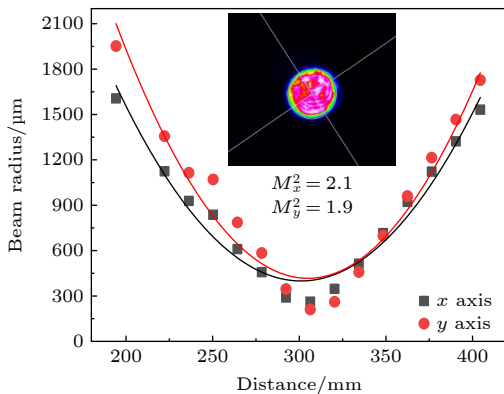


图 10 典型的优化后  $M^2$  测量结果, 插图为相应的远场二维光束空间分布图

Fig. 10. Typical optimized  $M^2$  measurement results, with the corresponding far-field 2D beam spatial distribution shown in the inset.

源的开发,对工业和应用领域具有重要的支撑作用.不同于传统稳区设计,高斯镜非稳腔通过引入可控的大模场稳区,能够在一定程度上突破传统设计限制.有理由相信,在未来的研究中,随着人工智能算法的不断普及,以及科研中对 AI for Science 的广泛认可,该类优化方法有望进一步提升激光器设计的效率,并为高性能激光源的开发提供新的思路.

## 参考文献

- [1] Zhu Z D, Lv S W, Zhang H Y, Hui Y L, Lei H, Li Q 2021 *Opt. Express* **29** 32325
- [2] Li C Y, Lu C Q, Li C, Yang N, Li Y, Yang Z, Han S, Shi J F, Zhou Z W 2017 *Opt. Commun.* **394** 1
- [3] Li C Y, Lu C Q, Li C, Zang Y N, Yang Z, Han S, Li Y, Yang N, Shi J F, Zhou Z W 2017 *Opt. Commun.* **56** 116115
- [4] Fan Z W, Qiu J S, Kang Z J, Chen Y Z, Ge W Q, Tang X X 2017 *Light-Sci. Appl.* **6** e17004
- [5] Lu S W, Gao M, Yang Y, Zhu R, Hou X, Sun J F, Chen W B, Zhu X L 2019 *Appl. Opt.* **58** 7517
- [6] Qi Y F, Zhu X L, Lou Q H, Ji J H, Dong J X, Wei R R 2007 *J. Opt. Soc. Am. B-Opt. Phys.* **24** 1042
- [7] Shen X, Zhou H, Zhen R L, Zhen J J, Wei W 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 024210 (in Chinese) [沈骁, 邹辉, 郑锐林, 郑加金, 韦玮 2015 物理学报 **64** 024210]
- [8] Zhou W Z, Li X P, Yang J, Yang T L, Wang X J, Liu B J, Wang H Z, Yang J B, Peng Q J 2023 *Acta Phys. Sin.* **72** 014204 (in Chinese) [周王哲, 李雪鹏, 杨晶, 杨天利, 王小军, 刘炳杰, 王浩竹, 杨俊波, 彭钦军 2023 物理学报 **72** 014204]
- [9] Murdough M P, Denman C A 1996 *Appl. Opt.* **35** 5925
- [10] Cerullo G, Desilvestri S, Magni V, Svelto O 1993 *Opt. Quantum Electron.* **25** 489
- [11] Bo Y, Geng A C, Bi Y, Sun Z P, Yang X D, Li R N, Cui D F, Xu Z Y 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1171 (in Chinese) [薄勇, 耿爱丛, 毕勇, 孙志培, 杨晓东, 李瑞宁, 崔大复, 许祖彦 2006 物理学报 **55** 1171]
- [12] He G Y, Guo J, Jiao Z X, Wang B 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 094217 (in Chinese) [何广源, 郭靖, 焦中兴, 王彪 2012 物理学报 **61** 094217]
- [13] Siegman A E 1974 *Appl. Opt.* **13** 353
- [14] Liu Q, Liu J, Gong M 2011 *Appl. Opt.* **50** 1186
- [15] Han C H, Mu Y, Luo H, Han L, Fang C, Wang S B, Wei L 2024 *Laser Infrared* **54** 179 (in Chinese) [韩昌昊, 穆宇, 罗辉, 韩隆, 方聪, 王思博, 魏磊 2024 激光与红外 **54** 179]
- [16] Hauck R, Kortz H P, Weber H 1980 *Appl. Opt.* **19** 598
- [17] Woodward R I, Kelleher E J R 2016 *Sci. Rep.* **6** 37616
- [18] Fang Z W, Pu G Q, Xu Y X, Hu W S, Yi L L 2023 *Opt. Express* **31** 41794
- [19] Shi H D, Fan R H, He C F, Wang J Y, Yang S, Xu M, Sun H Y, Li Y C, Fu Q 2024 *Photonics* **11** 164
- [20] Liu Z C, Dang Z B, Liu Z X, Li Y, He X, Dai Y C, Chen Y X, Peng P, Fang Z Y 2023 *Photonics Res.* **11** 695
- [21] Wang N, Lu Y T, Kong Y 2004 *Chin. J. Lasers* **31** 1317 (in Chinese) [王宁, 陆雨田, 孔勇 2004 中国激光 **31** 1317]
- [22] Kirkpatrick S, Gelatt C, Vecchi M 1983 *Science* **220** 671
- [23] Zhao Z J, Xu S Y, Zheng S L, Yang X N 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 5118 (in Chinese) [赵知劲, 徐世宇, 郑仕链, 杨小牛 2009 物理学报 **58** 5118]
- [24] Shapiro J 2001 *Machine Learning and Its Applications: Advanced Lectures (Berlin, Heidelberg)* **2001** pp146-168
- [25] Li X P, Yang J, Zhang M S, Yang T L, Wang X J, Peng Q J 2022 *Chin. Phys. B* **31** 084207

# Generation of nano second laser with wide stable region and large mode field based on artificial intelligence algorithm\*

LI Jingyu<sup>1)2)</sup> YANG Jing<sup>1)3)†</sup> WANG Hao<sup>1)2)</sup> LI Xuepeng<sup>1)2)</sup>  
 NING Zihao<sup>1)3)</sup> GAO Hongwei<sup>1)</sup> WANG Xiaojun<sup>1)2)</sup>  
 ZHAO Tianzhuo<sup>1)</sup> FAN Zhongwei<sup>1)3)</sup> XU Zuyan<sup>1)2)</sup>

1) (*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

2) (*Key Laboratory of Function Crystal and Laser Technology, Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

3) (*Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China*)

( Received 22 April 2025; revised manuscript received 6 June 2025 )

## Abstract

This study presents an optimization method of generating a wide stable-zone, large mode field operation nanosecond laser oscillator based on artificial intelligence algorithms. The work is motivated by the need of the large mode field laser cavities in compact size with variable thermal focal length. A physics model of light field propagation inside the resonator is established by combining thermal lensing tolerance. A multi-objective optimization function is designed to simultaneously balance the beam quality, thermal stability, and cavity compactness. Several algorithms, such as simulated annealing, particle swarm optimization, and genetic algorithms are compared, and ultimately, efficient searching for optimal solutions in complex multi-dimensional parameter spaces is achieved. In the system design, the parameters of cavity segment length, intracavity lens, and Gaussian mirror (VRM) are optimized. Therefore, an optimized cavity structure is experimentally implemented and  $Q$ -switching operations are performed. The results demonstrate stable laser output at 100 Hz repetition rate with 190 mJ pulse energy and 7 ns pulse width, and beam quality factors  $M_x^2 = 2.1$  and  $M_y^2 = 1.9$  respectively, and the total length of the cavity is only 540 mm, which demonstrates the compactness of laser design. Furthermore, numerical simulations are conducted to compare a variety of resonator configurations and assess the influence of different parameters on the cavity's thermal stability. After the optimization, the thermal stability curve of the laser resonator shows a significant decrease in slope near the large-mode-field region, indicating an improvement in thermal length adaptability. This enhancement is crucial for ensuring long-term stable operation of high-repetition-rate nanosecond laser oscillators. In summary, this study provides an efficient approach for designing compact, thermally stable, large-mode-area resonators, and valuable insights into designing compact laser with high power output.

**Keywords:** solid-state laser, large mode area, artificial intelligence, multi-parameter optimization

**PACS:** 42.55.Rz, 42.60.Jf

**DOI:** [10.7498/aps.74.20250519](https://doi.org/10.7498/aps.74.20250519)

**CSTR:** [32037.14.aps.74.20250519](https://cstr.cn/32037.14.aps.74.20250519)

\* Project supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant Nos. 2024YFB4608400, 2023YFF1303603) and the Major Equipment and Application Program of Guangdong Province, China (Grant No. CC/ZN-202402ZJ0301).

† Corresponding author. E-mail: [yangjing02@aircas.ac.cn](mailto:yangjing02@aircas.ac.cn)

## 基于人工智能算法的宽稳区大模场纳秒激光产生

李晶宇 杨晶 王浩 李雪鹏 宁梓豪 高宏伟 王小军 赵天卓 樊仲维 许祖彦

### Generation of nano second laser with wide stable region and large mode field based on artificial intelligence algorithm

LI Jingyu YANG Jing WANG Hao LI Xuepeng NING Zihao GAO Hongwei WANG Xiaojun ZHAO Tianzhuo FAN Zhongwei XU Zuyan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 164206 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20250519

CSTR: 32037.14.aps.74.20250519

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250519>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

“机器微纳光学科学家”：人工智能在微纳光学设计的应用与发展

“Machine micro/nano optics scientist” : Application and development of artificial intelligence in micro/nano optical design

物理学报. 2023, 72(11): 114204 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230208>

人工智能赋能量子通信与量子传感系统

Research progress of artificial intelligence empowered quantum communication and quantum sensing systems

物理学报. 2025, 74(12): 120301 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250322>

基于去噪概率扩散模型的蝠鲼流场智能化预测

Intelligent prediction of manta ray flow field based on a denoising probabilistic diffusion model

物理学报. 2025, 74(10): 104701 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241499>

大模场一维高阶厄米-高斯激光束产生

Generation of one-dimensional high-order Hermite-Gaussian laser beams with large mode volume

物理学报. 2023, 72(1): 014204 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221422>

叠层相干衍射成像算法发展综述

Review of development for ptychography algorithm

物理学报. 2023, 72(5): 054202 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221889>

量子人工智能中的对抗学习

Adversarial learning in quantum artificial intelligence

物理学报. 2021, 70(14): 140302 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210789>