

谐振腔状态对高功率Nd:YAG脉冲固体激光器光束指向稳定性的影响

傅超 王石语 李兵斌 李乐群

Influence of resonant cavity state on beam pointing stability of high-power Nd:YAG pulsed solid-state laser

FU Chao, WANG Shiyu, LI Bingbin, LI Lequn

引用本文:

傅超, 王石语, 李兵斌, 等. 谐振腔状态对高功率Nd:YAG脉冲固体激光器光束指向稳定性的影响[J]. 应用光学, 2024, 45(6): 1298–1306. DOI: 10.5768/JAO202445.0607003

FU Chao, WANG Shiyu, LI Bingbin, et al. Influence of resonant cavity state on beam pointing stability of high-power Nd:YAG pulsed solid-state laser[J]. Journal of Applied Optics, 2024, 45(6): 1298–1306. DOI: 10.5768/JAO202445.0607003

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0607003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

光束指向稳定性高精度检测方法研究

High precision measurement method of laser beam pointing stability

应用光学. 2022, 43(2): 339–344 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0207001>

半外腔Nd:YAG和Nd:YVO₄微片固体激光器的腔调谐特性研究

Characteristics of cavity tuning of half-external cavity Nd:YAG and Nd:YVO₄ microchip solid-state lasers

应用光学. 2023, 44(2): 437–443 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0207002>

高功率固体激光器增益非均匀分布引起的效能亏损效应研究

Efficiency loss induced by non-uniform gain distribution in high power solid state lasers

应用光学. 2019, 40(4): 542–550 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0401003>

高功率激光器光束质量测量的衰减缩束实验

Experiment on attenuation and compression in beam quality measurement of high power laser

应用光学. 2023, 44(6): 1250–1257 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0610012>

基于高斯过程回归的线性激光束指向稳定优化

Optimization of linear laser beam pointing stability based on Gaussian process regression

应用光学. 2023, 44(6): 1265–1272 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0610014>

200 mJ半导体端面泵浦MOPA激光器研究

Research on 200 mJ semiconductor end-pumped MOPA Laser

应用光学. 2019, 40(3): 489–492 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0307001>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2024) 06-1298-09

谐振腔状态对高功率 Nd:YAG 脉冲固体激光器光束指向稳定性的影响

傅 超, 王石语, 李兵斌, 李乐群

(西安电子科技大学 光电工程学院, 陕西 西安 710071)

摘 要: 针对评估高功率固体激光器光束指向角不稳定性的需求, 构建了考虑热分布和增益分布的激光光场数值计算模型, 分析了谐振腔输出镜和反射镜失谐程度对光束指向稳定性的影响。定义了腔镜转动微扰因子和腔镜移动微扰因子, 分别描述腔镜平行失谐和共轴失谐的程度, 并在谐振腔光场计算中引入了微扰因子、热效应调制和增益调制。利用该方法研究了高功率 Nd:YAG 固体激光器在腔镜失谐状态下, 谐振腔参数对光束指向稳定性的影响。抽运功率为 10 000 W, 腔镜转动微扰因子和腔镜移动微扰因子分别在 $1 \times 10^{-4} \sim 50 \times 10^{-4}$ 和 $1 \times 10^{-7} \sim 50 \times 10^{-7}$ 范围内变化时, 激光束指向偏移角均方根值在抽运脉冲时间内的波动范围为 $1 \times 10^{-6} \text{ rad} \sim 5 \times 10^{-3} \text{ rad}$ 。

关键词: 高功率固体激光器; 光束指向稳定性; 谐振腔失谐; LD 端面泵浦

中图分类号: TN248

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202445.0607003

Influence of resonant cavity state on beam pointing stability of high-power Nd:YAG pulsed solid-state laser

FU Chao, WANG Shiyu, LI Bingbin, LI Lequn

(School of Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: A numerical calculation model of laser light field considering thermal distribution and gain distribution was constructed to evaluate the beam pointing angle instability of high-power solid-state lasers. The influence of the detuning degree of the resonant cavity output mirror and the mirror on the beam pointing stability was analyzed. The cavity mirror rotation perturbation factor and the cavity mirror movement perturbation factor were defined to describe the degree of parallel detuning and coaxial detuning of the cavity mirror, respectively, and the perturbation factor, thermal effect modulation and gain modulation were introduced in the calculation of the resonant cavity light field. The influence of resonant cavity parameters on the beam pointing stability of high-power Nd:YAG solid-state laser under the condition of cavity mirror detuning was studied. When the pump power is 10 000 W, and the cavity mirror rotation perturbation factor and the cavity mirror movement perturbation factor changing in the range of $1 \times 10^{-4} \sim 50 \times 10^{-4}$ and $1 \times 10^{-7} \sim 50 \times 10^{-7}$, respectively, the fluctuation range of the root mean square value of laser beam pointing offset angle in the pump pulse time is $1 \times 10^{-6} \text{ rad} \sim 5 \times 10^{-3} \text{ rad}$.

Key words: high-power solid-state laser; beam pointing stability; resonant cavity detuning; LD end-pumping

引言

高功率固体激光器在军事和科研方面有着重要的需求, 近年来引起了广泛的关注^[1-5]。高功率固体 Nd:YAG 激光器因其结构简单紧凑、体积小、

寿命长、输出稳定等优点, 在激光材料加工、测量、切割, 光谱分析, 光通信等领域有着广泛的应用^[6-12], 已成为军事行动的主要武器之一。

对于适用于远距离战场环境的高功率固体激

收稿日期: 2023-10-31; 修回日期: 2023-12-12

作者简介: 傅超 (1985—), 女, 博士研究生, 主要从事高功率固体激光器研究。E-mail: fuchao@vip.126.com

光器而言,除了功率高、光束质量好外,光束指向稳定性好也是一项重要的指标,其优劣能够直接影响激光武器的作战效能,但迄今为止,相关研究较少。2016年,DING L等人利用科学级 CCD 对纳秒级单脉冲高功率钕玻璃激光系统中的光束指向稳定性问题进行了研究^[13],得到了光斑直径为 60 mm、能量为 100 J、波长为 1 053 nm 的输出激光,并得出了该激光系统光束指向长期角度漂移均方根 (root mean square, RMS) 值小于 17 μrad 的结论,该研究重点测试了激光系统光束指向漂移角的实验数值,并未深入分析光束指向不稳定的影响因素。2019年,XIE M L等人研究了高精度激光束指向技术在机载瞄准吊舱中的应用^[14],得到了激光系统光束质量偏移角最大指向误差为 0.015°、RMS 值为 0.0075°的结论,该研究主要分析了飞行器扰动和大气湍流对光束指向稳定性的影响,并未进行激光器谐振腔工作状态对输出光束指向稳定性影响的研究。2008年,DIXIT S K等人首次全面研究了铜蒸气激光器的光束指向稳定性^[15],结果表明:采用广义衍射滤波谐振腔能够获得的最小光束指向漂移角为 8 μrad ,而采用平平腔能够获得的最大光束指向漂移角为 120 μrad ,非稳腔的光束指向漂移角介于两者之间,该研究重点分析了理想状态下(谐振腔镜平行且共轴)不同类型光学谐振腔的光束指向稳定性,并未研究腔镜失谐对光轴指向稳定性的影响。

本文给出了一种用于分析腔镜失谐对激光器光束指向稳定性影响的数值计算模型,该模型重点考虑了实际应用过程中,激光器由于加工、装配误差和运作抖动等因素导致的谐振腔镜不平行和离轴问题,定义了腔镜转动微扰因子和腔镜移动微扰因子以描述平行失谐和共轴失谐的程度,通过优化 Fox-Li 经典开腔模式迭代算法^[16-17],计算腔镜失谐条件下激光器的输出模式,分析了不同谐振腔的光束指向稳定性。

1 理论模型

1.1 激光器模型及其光束指向

图 1 所示为 LD 泵浦固体激光器, M_1 为反射镜,曲率半径为 R_1 , M_2 为输出镜,曲率半径为 R_2 ,谐振腔腔长为 L ,反射镜和输出镜半宽分别为 a_1 、 a_2 ,则等效菲涅尔数 $N_{\text{eq}} = \frac{a_1 a_2}{\lambda L}$ 。

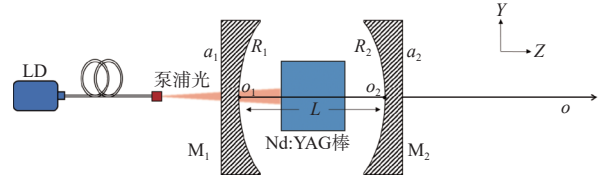


图 1 LD 泵浦固体激光器

Fig. 1 LD pumped solid-state laser

激光器光束指向定义为输出镜中心和远场光斑中心所在直线,远场光斑中心位置坐标为

$$\begin{cases} x = \frac{\int xI(x,y)dxdy}{\int I(x,y)dxdy} \\ y = \frac{\int yI(x,y)dxdy}{\int I(x,y)dxdy} \end{cases} \quad (1)$$

光束指向偏移角定义为

$$\theta = \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{z} \quad (2)$$

1.2 计算模型

图 2 所示为高功率固体 Nd:YAG 激光器谐振腔计算模型,将工作介质 Nd:YAG 等效为厚度不计的孔径光阑,理想条件下输出镜、反射镜和孔径光阑平行且共轴。

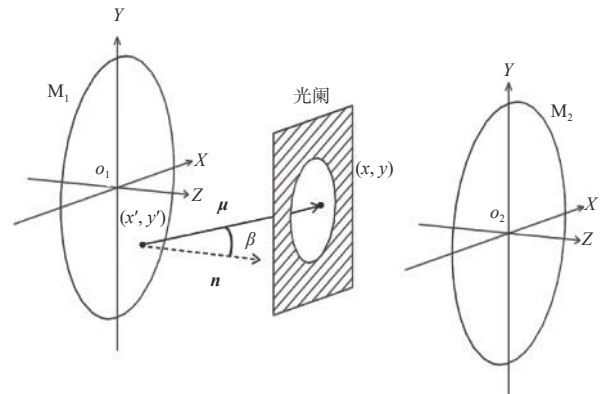


图 2 高功率固体 Nd:YAG 激光器谐振腔计算模型

Fig. 2 Calculation model of resonator of high-power solid-state Nd:YAG laser

Fox-Li 开腔模式迭代算法是计算激光器稳定输出模式的经典算法,菲涅尔-基尔霍夫衍射积分公式是 Fox-Li 算法的核心公式^[18-19],大量的研究表明:该公式能够给出与工程实验偏差较小的计算结果,具体形式为

$$U_2(x,y) = \frac{ik}{4\pi} \iint_{S_1} U_1(x',y') \frac{e^{-ik\mu}}{\mu} (1 + \cos\beta) ds \quad (3)$$

式中: S_1 为反射镜 M_1 镜面;其光场分布为 $U_1(x',y')$;光阑处光场分布为 $U_2(x,y)$; k 为振荡光波矢; μ 为点

(x', y') 与点 (x, y) 的距离; β 为点 (x', y') 处 μ 与法线 n 的夹角。

光阑处存在由增益和热效应引起的调制, 具体形式为

$$U'_2(x, y) = \exp(G(x, y)) \exp(-i\Delta\varphi(x, y)) U_2(x, y) \quad (4)$$

式中: $U_2(x, y)$ 为振荡光在等效光阑处的光场分布; $U'_2(x, y)$ 为调制后等效光阑处的光场分布; $G(x, y)$ 和 $\Delta\varphi(x, y)$ 分别为单程增益分布和相位差分布。单程增益由工作介质对泵浦光能量的吸收并转化为反转粒子数密度产生^[20], 其表达式为

$$G(x, y) = \sigma \int_0^l N_0(x, y, z) dz = \frac{\sigma\tau}{h\nu} P_{in} (1 - \exp(-\alpha_p l)) \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right) \int_0^l \frac{\partial I(x, y, z)}{\partial z} dz \quad (5)$$

式中: σ 为受激发射截面; N_0 为反转粒子数; τ 为上能级粒子寿命; P_{in} 为泵浦功率; $h\nu$ 为泵浦光单光子能量。 $I(x, y, z)$ 为半导体泵浦光在工作介质泵浦端面上的分布, 归一化函数为^[21]

$$I(x, y, z) = \frac{2\alpha_p}{\pi\omega_p^2 [1 - \exp(-\alpha_p l)]} \times \left[\exp\left(-2\left(\frac{x^2 + y^2}{\omega_p^2}\right)\right) \right] \exp(-\alpha_p z) \quad (6)$$

式中: α_p 为工作介质对泵浦光的吸收系数; l 为工作介质的长度; ω_p 为泵浦光斑半径。单程相位差分布的表达式为

$$\Delta\varphi(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta_{OPD} = \frac{2\pi}{\lambda} \int_0^l \Delta n(x, y, z) dz \quad (7)$$

$$\Delta n(x, y, z) = \frac{dn}{dT} (T(x, y, z) - T(0, 0, z)) \quad (8)$$

式中: $T(x, y, z)$ 为工作介质的温度场分布; $T(0, 0, z)$ 为中心轴上温度; Δ_{OPD} 为光程差; dn/dT 为工作介质热光系数。对于各向同性的工作介质, 其各个方向的热特性是相同和轴对称的, 在柱坐标系下, 工作介质的瞬态热传导方程可以表示为^[22]

$$\gamma \times \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q(r, z) g(t) = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (9)$$

式中: $r^2 = x^2 + y^2$; γ 为工作介质的导热系数; ρ 为工作介质密度; C_p 为工作介质比热容; $q(r, z)$ 为热源函数; $g(t)$ 为包络函数。热源函数的具体形式为

$$q(r, z) = P_{in} \eta (1 - \exp(-\alpha_p l)) I(r, z) \quad (10)$$

式中 η 为工作介质的热转换系数。泵浦源在准连续模式下工作时, 包络函数 $g(t)$ 可表示为

$$g(t) = \begin{cases} 1, & nt_p \leq t \leq nt_p + t_w \\ 0, & nt_p + t_w < t < (n+1)t_p + t_w \end{cases} \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (11)$$

式中: t_p 为泵浦周期; t_w 为泵浦光的脉冲宽度。

Fox-Li 开腔模迭代算法通过对初始光场进行多次迭代, 仿真激光在谐振腔内往返振荡的过程, 当振荡达到稳态时, 输出镜处光场分布为激光器的稳态输出模式, 并满足自再现条件^[16-17]:

$$U_1^{m+1} = A_{d1} \exp(G) \exp(-i\Delta\varphi) A_{2d} A_{d2} \cdot \exp(G) \exp(-i\Delta\varphi) A_{1d} U_1^m = \delta U_1^m \quad (12)$$

式中: m 为振荡次数; δ 为自再现系数; A_{ij} ($i, j = 1, 2$, d)为反射镜、输出镜和等效光阑之间的传输矩阵。

2 腔镜失谐因子

如图3所示, 在实际应用过程中, 由于激光器存在加工、装配误差和运作抖动等因素的影响, 谐振腔镜姿态与理想状态存在偏差, 包括转动偏差和移动偏差。

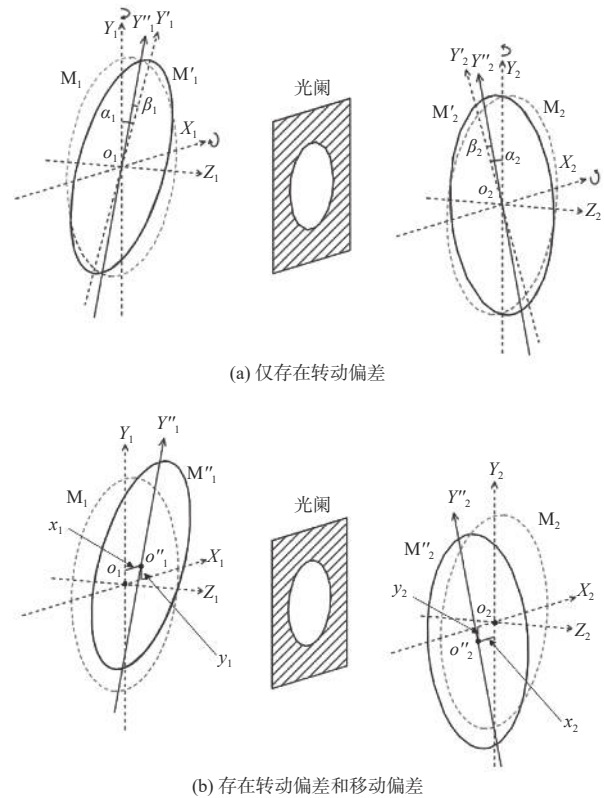


图3 谐振腔镜失谐状态示意图

Fig. 3 Schematic diagram of detuning state of resonant cavity mirror

图3(a)中 M'_1 和 M'_2 分别为转动失谐状态下的反射镜和输出镜, α_i ($i = 1, 2$)和 β_i ($i = 1, 2$)分别为反射

镜和输出镜的俯仰转动失谐量和水平转动失谐量;图3(b)中 M'_1 和 M'_2 分别为转动和移动共同失谐状态下的反射镜和输出镜, $x_i(i=1,2)$ 和 $y_i(i=1,2)$ 分别为反射镜和输出镜的垂直移动失谐量和水平移动失谐量。

如图4所示, $A(x',y',z')$ 为球面反射镜 M_1 上的一点, C 为球心,则有:

$$o_1A = \sqrt{y'^2 + o_1E^2} = \sqrt{y'^2 + (R_1 - \sqrt{R_1^2 - x'^2 - y'^2})^2} \quad (13)$$

当 M_1 仅为俯仰转动失谐时,点 A 在 X 轴上的投影长度始终不变,因此可将点 A 投影至 Y_0Z 面内分析点 A 在 Y 、 Z 两轴上的投影长度变化。如图5所示, A_1 为未失谐状态下点 A 在 Y_0Z 面内的投影, A_2 为俯仰失谐状态下点 A 在 Y_0Z 面内的投影,则有:

$$\begin{aligned} \angle A_2o_1E' &= \angle E - \alpha_1(t) = \arcsin\left(\frac{y'}{o_1A}\right) - \alpha_1(t) \quad (14) \\ o_1E' &= \cos(\angle A_2o_1E') \times o_1A = \\ &\cos\left[\arcsin\left(\frac{y'}{\sqrt{y'^2 + (R_1 - \sqrt{R_1^2 - x'^2 - y'^2})^2}}\right) - \alpha_1(t)\right] \times \\ &\sqrt{y'^2 + (R_1 - \sqrt{R_1^2 - x'^2 - y'^2})^2} \quad (15) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} y'' &= A_2E' = \sin(\angle A_2o_1E') \times o_1A = \\ &\sin\left[\arcsin\left(\frac{y'}{\sqrt{y'^2 + (R_1 - \sqrt{R_1^2 - x'^2 - y'^2})^2}}\right) - \alpha_1(t)\right] \times \\ &\sqrt{y'^2 + (R_1 - \sqrt{R_1^2 - x'^2 - y'^2})^2} \quad (16) \end{aligned}$$

式中 $\alpha_1(t) \sim U(-b, b)$ 。定义 b 与激光发散角(半角)的比值为转动微扰因子 ε ,则有:

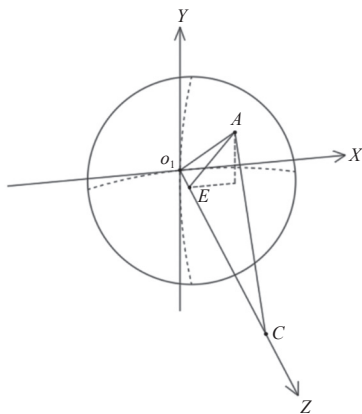


图4 镜 M_1 未失谐

Fig. 4 Ideal mirror M_1

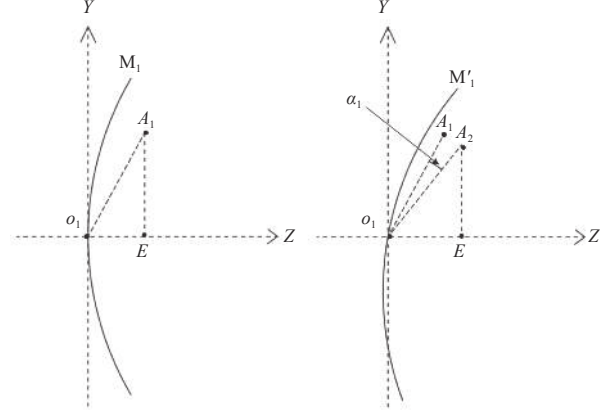


图5 镜 M_1 在 Y_0Z 面内的投影

Fig. 5 Projection of mirror M_1 into Y_0Z plane

$$\varepsilon = \frac{b}{\theta_0} = b \sqrt{\frac{\pi f_e}{\lambda}} \quad (17)$$

式中:

$$\begin{cases} f_e = \sqrt{\frac{L^2(1-g_1g_2)g_1g_2}{(g_1+g_2-2g_1g_2)^2}} \\ g_1 = \frac{L}{R_1} \\ g_2 = \frac{L}{R_2} \end{cases} \quad (18)$$

当镜 M_1 存在俯仰转动偏差和水平转动偏差时,点 A 在 X 轴上的投影长度始终不变,同理可将旋转后的点 A 投影至 X_0Z 面内分析点 A 在 Y 、 Z 两轴上的投影长度变化,可得:

$$y'' = \sin\left[\arcsin\left(\frac{x'}{\sqrt{o_1E'^2 + x'^2}}\right) - \beta_1(t)\right] \times \sqrt{o_1E'^2 + x'^2} \quad (19)$$

$$z'' = \sin\left[\arcsin\left(\frac{x'}{\sqrt{o_1E'^2 + x'^2}}\right) - \beta_1(t)\right] \times \sqrt{o_1E'^2 + x'^2} \quad (20)$$

式中 $\beta_1(t) \sim U(-b, b)$ 。

引入移动失谐量后式(4)中的 μ 和 $\cos\beta$ 可表示为

$$\mu = \sqrt{(x'' + x_1(t) - x)^2 + (y'' + y_1(t) - y)^2 + (z'' - z)^2} \quad (21)$$

$$\cos\beta = \frac{\vec{n} \cdot \vec{\mu}}{|\vec{n}| |\vec{\mu}|} = \frac{\vec{n} \cdot \vec{\mu}}{R_1 \times \mu} \quad (22)$$

式中 $x_1(t), y_1(t) \sim U(-c, c)$ 。定义 c 与激光束腰半径的比值为移动微扰因子 ξ ,其表达式为

$$\xi = \frac{c}{\omega_0} = c \sqrt{\frac{\pi}{\lambda f_e}} \quad (23)$$

3 仿真结果及讨论

3.1 热效应及增益

利用 Matlab 仿真软件对 Nd:YAG 晶体内部的热传导过程进行仿真, 晶体参数和边界条件为: Nd:YAG 晶体的导热系数 $\gamma = 0.013 \text{ W}/(\text{mm} \cdot \text{K})$, 密度为 $\rho = 4.5 \times 10^{-3} \text{ g}/\text{mm}^3$, 热容为 $C_p = 0.56 \text{ J}/(\text{g} \cdot \text{K})$, 取晶体的直径为 $d = 10 \text{ mm}$, 泵浦光半径 $\omega_p = 1.5 \text{ mm}$, 晶体吸收系数 $\alpha = 0.73 \text{ mm}^{-1}$, 热转换系数 $\eta = 0.32$, 泵浦功率 $P_{\text{in}} = 10\,000 \text{ W}$, 泵浦脉宽 $t_w = 200 \mu\text{s}$ 。本文忽略了因晶体与热沉之间接触程度不同导致的晶体表面温度分布不均匀的情况, 近似用热沉温度来替代晶体边界温度; 初始时刻网格上任意节点的温度值 $T_0 = 300 \text{ K}$; 热沉区域内任意节点任意时刻温度值 $T = 300 \text{ K}$ 。

用有限差分法^[23]求解式(9)得到的晶体泵浦端面温度场变化情况如图6所示, 可以看出, 一个泵浦脉宽内各点温度值随时间的变化接近线性, 且呈中心对称分布。

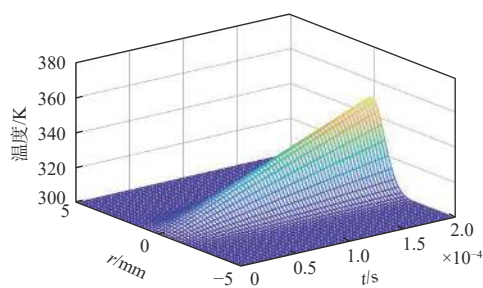


图6 晶体泵浦端面温度场分布

Fig. 6 Temperature field distribution of crystal pump end face

取热光系数 $dn/dT = 7.3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, 泵浦功率 $P_{\text{in}} = 10\,000 \text{ W}$, 由式(7)和式(8)计算得到 $t = 200 \mu\text{s}$ 时的一个泵浦脉宽内晶体端面附加相位差分布如图7所示, 可以看出, 不同时刻间附加相位差分布相似, 且呈中心对称分布。

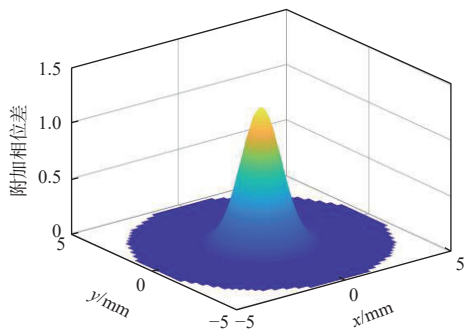


图7 泵浦端面附加相位差分布

Fig. 7 Additional phase difference distribution of pump end surface

取受激吸收截面 $\sigma = 5.3 \times 10^{-18} \text{ mm}^2$, 单光子能量 $h\nu = 2.46 \times 10^{-19} \text{ J}$, 上能级粒子寿命 $\tau = 230 \mu\text{s}$, 由式(5)计算得到的增益分布如图8所示, 可以看出, 增益也呈中心对称分布。

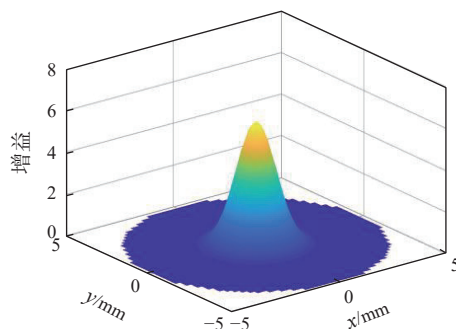


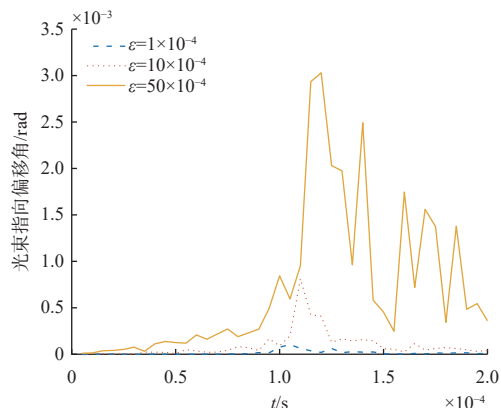
图8 不同泵浦时刻下的增益分布

Fig. 8 Gain distribution at different pumping times

理想状态下谐振腔镜平行且共轴, 增益和热效应应在泵浦脉宽内任意时刻均呈中心对称分布。由 Fox-Li 算法的中心对称性可知, 激光器的输出模式始终保持中心对称分布, 光束指向持续稳定。

3.2 腔镜失谐对光束指向稳定性的影响

取谐振腔参数 $L = 100 \text{ mm}$, $R_1 = R_2 = 100 \text{ mm}$, $a_1 = a_2 = 20 \text{ mm}$, 不同微扰因子对单个泵浦脉宽内不同时刻光束指向偏移角的影响如图9所示, 图9(a)中移动微扰因子 $\xi = 0$, 图9(b)中转动微扰因子 $\varepsilon = 0$, 可以看出, 光束指向偏移角在整个泵浦脉宽内存在波动, 转动微扰因子越大, 光束指向偏移角越大, 光束指向波动越明显。光束指向偏移角波动幅度在单个泵浦脉宽内随时间变化明显, 这是由于高功率泵浦条件下, 随时间增强的热效应改变了谐振腔型, 不同微扰因子对不同谐振腔光束指向偏移角的干扰能力有明显不同所致。



(a) 不同转动微扰因子

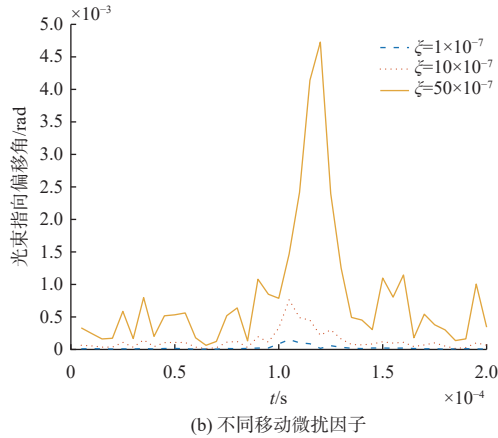


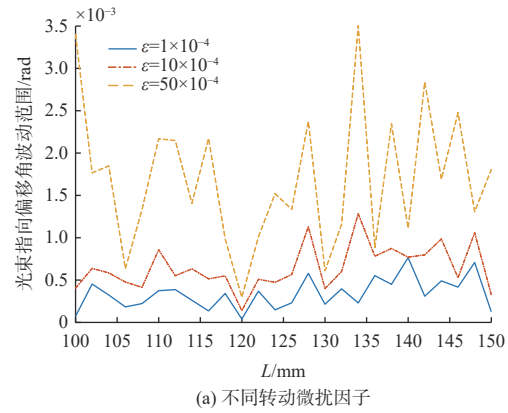
图9 光束指向偏移角随时间变化曲线

Fig. 9 Variation curves of beam pointing deviation angle with time

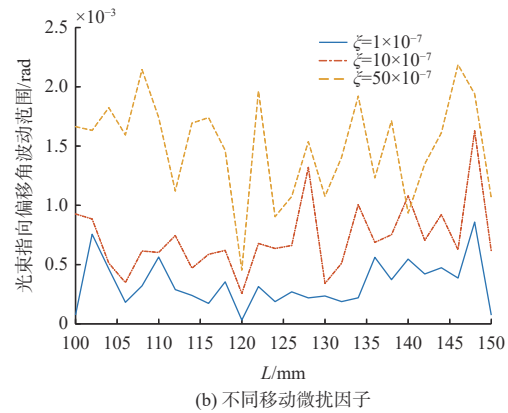
3.3 腔长对腔镜失谐条件下光束指向稳定性的影响

为进一步研究腔镜失谐条件下谐振腔参数对光束指向稳定性的影响,定义光轴指向偏移角波动范围大小(单个泵浦脉宽内光束指向偏移角最大值与最小值之差)为评价光轴指向稳定性优劣的标准。取 $R_1 = R_2 = 100 \text{ mm}$, $a_1 = a_2 = 20 \text{ mm}$, 不同转动微扰因子和移动微扰因子条件下腔长对光束指向稳定性的影响如图 10 所示。可以看出,激光器光束指向稳定性在腔长 $100 \text{ mm} \sim 150 \text{ mm}$ 范围内存在明显波动。图 10(a) 中,取 $\xi = 0$, 转动微扰因子越大,光束指向偏移角波动范围越大,光束指向稳定性越差。对于确定的腔镜微扰因子,存在光束指向稳定性最好的谐振腔,当 $\varepsilon = 50 \times 10^{-4}$ 时, $L = 120 \text{ mm}$ 对应的谐振腔为光束指向稳定性最好的谐振腔,有最小光轴指向偏移角波动范围 $2.96 \times 10^{-4} \text{ rad}$ 。图 10(b) 中,取 $\varepsilon = 0$, 移动微扰因子越大,光束指向偏移角波动范围越大,当 $\xi = 50 \times 10^{-7}$, $L = 120 \text{ mm}$ 对应的谐振腔为光束指向稳定性最好的谐振腔,光轴指向偏移角波动范围有最小值 $4.54 \times 10^{-4} \text{ rad}$ 。同时,图 10(a) 中不同转动微扰因子影响曲线的波动走势相似,这是由于在增益和温度场分布,以及其他谐振腔参数不变的条件下,腔长是影响激光器输出模式的主要因素,不同腔长间的输出模式差异较大。相同腔长条件下,腔镜失谐仅对输出激光光场分布产生微小变化,不同微扰因子间数值越接近,表明微扰因子对输出模式的影响程度越小,该谐振腔抗干扰能力越强,可以看出,腔长 $L = 120 \text{ mm}$ 时,该谐振腔抗干

扰能力最强。



(a) 不同转动微扰因子



(b) 不同移动微扰因子

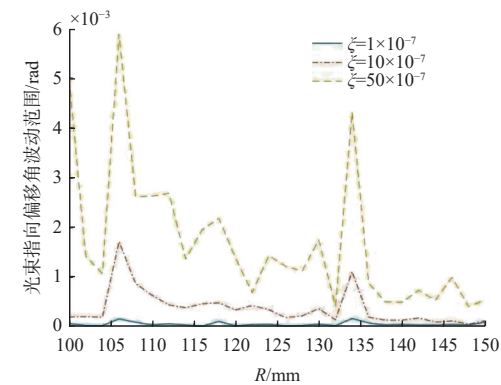
图 10 光束指向偏移角在单个泵浦脉宽内波动范围随腔长变化曲线

Fig. 10 Variation curves of beam pointing deviation angle fluctuates with cavity length within single pump pulse width

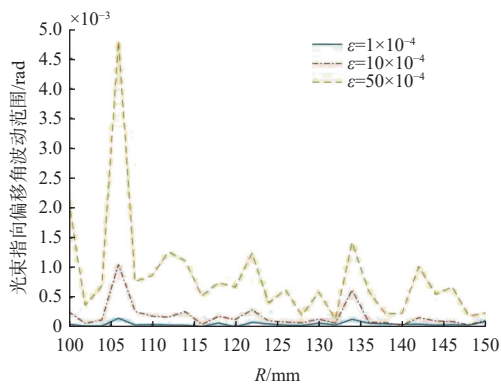
3.4 曲率半径对腔镜失谐条件下光束指向稳定性的影响

取 $L = 100 \text{ mm}$, $a_1 = a_2 = 20 \text{ mm}$, 不同转动微扰因子和移动微扰因子条件下曲率半径 ($R_1 = R_2 = R$) 对光束指向稳定性的影响如图 11 所示。光束指向稳定性的变化在曲率半径 $100 \text{ mm} \sim 150 \text{ mm}$ 范围内存在明显波动。图 11(a) 中,取 $\xi = 0$, 转动微扰因子越大,光束指向偏移角波动范围越大,光束指向稳定性越差。对于确定的腔镜微扰因子,存在光束指向稳定性最好的谐振腔,当 $\varepsilon = 50 \times 10^{-4}$ 时, $R = 132 \text{ mm}$ 对应的谐振腔为光束指向稳定性最好的谐振腔,光轴指向偏移角波动范围有最小值 $1.40 \times 10^{-4} \text{ rad}$ 。图 11(b) 中,取 $\varepsilon = 0$, 移动微扰因子越大,光束指向偏移角波动范围越大,当 $\xi = 50 \times 10^{-7}$, $R = 148 \text{ mm}$ 对应的谐振腔为光束指向稳定性最好的谐振腔,光轴指向偏移角波动范围有最小值

4.15×10^{-4} rad。不同转动微扰因子和移动微扰因子对光束指向稳定性影响曲线的波动走势较图 10 更为一致,说明不同微扰因子对于不同曲率半径条件下光束指向稳定性影响的正相关性更强。当 $R = 132$ mm 时,该谐振腔抗干扰能力最强。



(a) 不同转动微扰因子



(b) 不同移动微扰因子

图 11 光束指向偏移角在单个泵浦脉宽内波动范围随曲率半径变化曲线

Fig. 11 Variation curves of beam pointing deviation angle fluctuates with curvature radius within single pump pulse width

4 实验结果及分析

对高功率 Nd:YAG 脉冲固体激光器光束指向稳定性进行了实验研究,实验装置如图 12 所示。实验采用万瓦泵浦的 Nd:YAG 水冷固体激光器,波长为 808 nm,重复频率为 5 Hz,衰减片至激光器输出镜的距离为 500 mm。图像采集设备为德国 IMAGING SOURCE 公司的 DMK 33GP1300 COMS 相机。

不同时刻相机采集到的光斑如图 13 所示。对应的光场分布如图 14 所示。可以看出,不同时刻光斑的光强分布不完全相同,通过式(1)计算光斑

中心位置,通过式(2)计算得到不同时刻光束指向偏移角,结果如图 15 所示。



图 12 实验装置

Fig. 12 Experimental apparatus

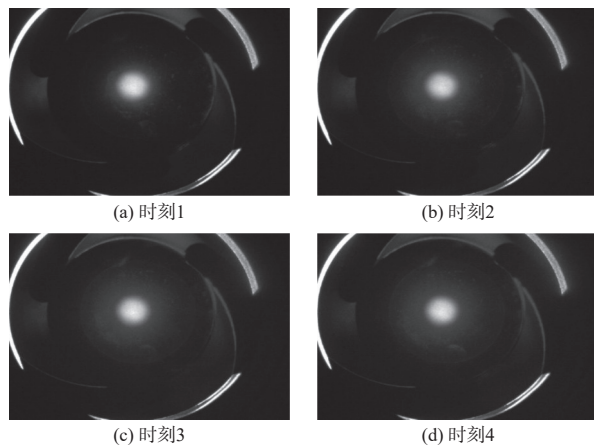
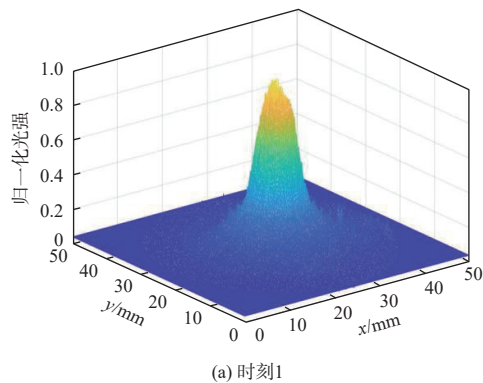
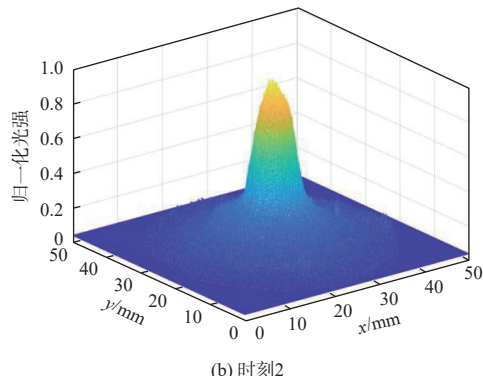


图 13 不同时刻衰减片上的光斑

Fig. 13 Light spots on film attenuated at different times



(a) 时刻1



(b) 时刻2

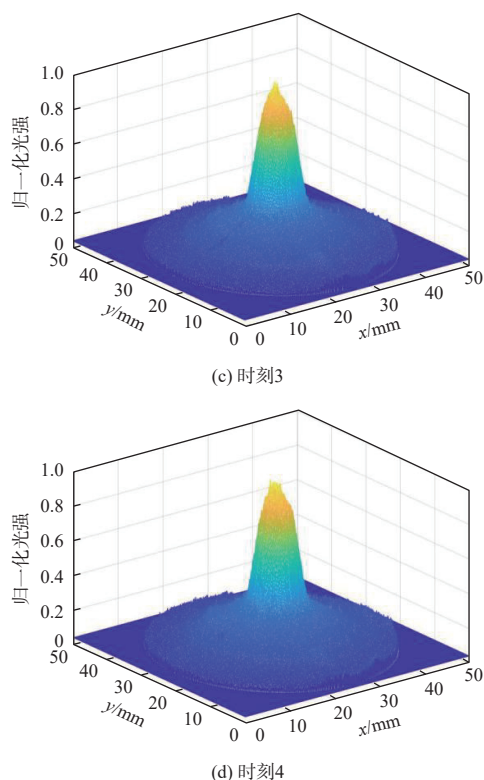


图 14 不同时刻衰减片上光斑的强度分布

Fig. 14 Intensity distribution of light spots on attenuating film at different times

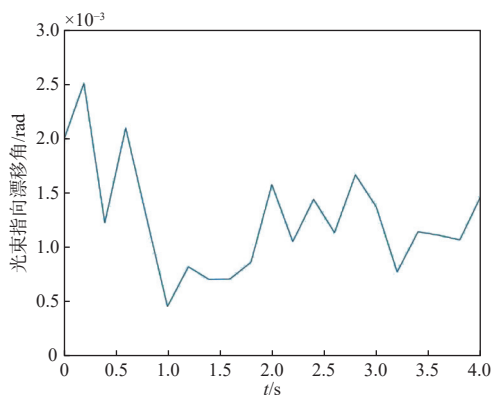


图 15 不同时刻光轴偏移角变化曲线

Fig. 15 Variation curve of optical axis offset angle at different times

可以看出,不同时刻激光器的光束指向偏移角存在波动,这是由于不同时刻谐振腔失谐程度存在波动导致的,波动范围为 2.04×10^{-3} rad,与仿真实验结果相符。其中误差是由于实验过程中偏振片中心与激光器光轴的微小偏差和泵浦光场分布扰动等因素的影响。

5 结论

本研究提出了一种用于分析高功率固体激光器光束指向不稳定性的数值计算模型,模型中定义了腔镜转动微扰因子和腔镜移动微扰因子,分别用于描述腔镜平行失谐和共轴失谐的程度,考虑了工作介质的热效应和增益,并以高功率 Nd:YAG 固体激光器为例,分析了腔镜失谐对不同谐振腔光束指向稳定性的影响。当抽运功率为 10 000 W,腔镜转动微扰因子和腔镜移动微扰因子分别在 $1 \times 10^{-4} \sim 50 \times 10^{-4}$ 和 $1 \times 10^{-7} \sim 50 \times 10^{-7}$ 范围内变化,腔长在 100 mm~150 mm 范围内变化,曲率半径在 100 mm~150 mm 范围内变化且腔镜直径在 20 mm~30 mm 范围内变化时,光束指向偏移角均方根值在单个泵浦脉冲时间内的波动范围为 1×10^{-6} rad~ 5×10^{-3} rad。可得出以下结论:光束指向偏移角在整个泵浦脉宽内存在波动,转动微扰因子越大,光束指向偏移角越大,光束指向波动越明显,但光束指向波动幅度在单个泵浦脉宽内基本不随时间变化。将光轴指向偏移角在单个泵浦脉宽内的波动范围大小作为评价激光器光束指向稳定性的标准,谐振腔参数的变化对光束指向稳定性有明显的影响,会引起光束指向稳定性的波动,对于确定的腔镜微扰状态,存在光束指向稳定性最好的谐振腔;对于不确定的腔镜微扰状态,存在抗微扰能力最强的谐振腔。实验结果与理论结果相吻合。

本研究提出的光束指向稳定性计算模型具有较高的可靠性和适用性,也可以对其他工作介质的高功率固体激光器光束指向稳定性进行计算分析,所得的关于光束指向稳定性的结论对研制高功率固体激光器具有参考意义,所得的关于不同参数谐振腔抗腔镜失谐微扰能力的结论对高功率固体激光器光束指向偏移角的量化控制和评估具有指导意义。

参考文献:

- [1] 王玉. 高功率激光器技术与产业发展概述[J]. 新材料产业, 2022(2): 47-50.
WANG Yu. Overview of high power laser technology and industrial development[J]. Advanced Materials Industry, 2022(2): 47-50.
- [2] 唐晓军, 王钢, 刘娇, 等. 高亮度固体激光器技术发展研究[J]. 中国工程科学, 2020, 22(3): 49-55.
TANG Xiaojun, WANG Gang, LIU Jiao, et al. Develop-

- ment of high brightness solid-state laser technology[J]. *Strategic Study of CAE*, 2020, 22(3): 49-55.
- [3] HUBER G, KRÄNKEL C, PETERMANN K. Solid-state lasers: status and future[J]. *Journal of the Optical Society of America, B. Optical Physics*, 2010, 27(11): 93-105.
- [4] 张立宏. 激光武器中高能激光器的发展展望[J]. *内蒙古科技与经济*, 2016(23): 95-96.
- ZHANG Lihong. Development prospect of high energy lasers in laser weapons[J]. *Inner Mongolia Science Technology & Economy*, 2016(23): 95-96.
- [5] 罗威, 董文锋, 杨华兵, 等. 高功率激光器发展趋势[J]. *激光与红外*, 2013, 43(8): 845-852.
- LUO Wei, DONG Wenfeng, YANG Huabing, et al. High power laser development trend[J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(8): 845-852.
- [6] DHUPAL D, DOLOI B, BHATTACHARYYA B. Modeling and optimization on Nd: YAG laser turned micro-grooving of cylindrical ceramic material[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2009, 47(9): 917-925.
- [7] MAHNKE P, PEUSER P, HUK P. Nd:YAG laser/KTiOAsO₄ (KTA) OPO system for laser ultrasound measurements on carbon-fiber-reinforced composite materials[J]. *Applied Physics B*, 2014, 116(2): 333-338.
- [8] 张松泓, 徐颖若. 固体脉冲 Nd:YAG 激光切割合金的工艺研究[J]. *应用激光*, 2020, 40(4): 724-729.
- ZHANG Songhong, XU Yingruo. Study on the technology of cutting alloy with solid pulse Nd:YAG laser[J]. *Applied Laser*, 2020, 40(4): 724-729.
- [9] XIANG H, CHEN B, WU W J, et al. An integral MPS model of blood coagulation by laser irradiation: application to the optimization of multi-pulse Nd:YAG laser treatment of port-wine stains[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 114: 1220-1233.
- [10] TORTSCHANOFF A, BAUMGART M, KROUPA G. Application of a compact diode pumped solid-state laser source for quantitative laser-induced breakdown spectroscopy analysis of steel[J]. *Optical Engineering*, 2017, 56(12): 1-8.
- [11] POSADAS-CASTILLO C, LÓPEZ-GUTIÉRREZ R M, CRUZ-HERNÁNDEZ C. Synchronization of chaotic solid-state Nd:YAG lasers: application to secure communication[J]. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2008, 13(8): 1655-1667.
- [12] XU J, KONG M W, LIN A B, et al. Directly modulated green-light diode-pumped solid-state laser for underwater wireless optical communication[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(9): 1664-1667.
- [13] DING L, LI S S, LU Z W, et al. Analysis of the beam-pointing stability in the high power laser system[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2016, 127(15): 6056-6061.
- [14] XIE M L, LIU P, MA C W, et al. Application research of high-precision laser beam pointing technology in airborne aiming pod[J]. *Optik*, 2019, 183: 775-782.
- [15] DIXIT S K, MAHAKUD R, PARAKASH O, et al. Role of optical resonator on the pointing stability of copper vapor laser beam[J]. *Optics Communications: A Journal Devoted to the Rapid Publication of Short Contributions in the Field of Optics and Interaction of Light with Matter*, 2008, 281(9): 2590-2597.
- [16] 雍富强. 激光谐振腔模式研究的数值矩阵方法[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
- YONG Fuqiang. Numerical matrix method for mode study of laser resonator[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005.
- [17] PAXTON A H, YANG C. Laser simulation applying Fox-Li iteration: investigation of reason for non-convergence[J]. *SPIE*, 2017, 10090: 233-239.
- [18] GOODMAN J W. Introduction to Fourier optics[M]. Roberts & Company Publishers, 2004: 96-120.
- [19] BORN M, WOLF E. Principles of optics[M]. 7th ed. Oxford: Cambridge University Press, 1999: 131-197.
- [20] 王汉清. 增益和热效应对高效能固体激光器影响研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
- WANG Hanqing. Influence of gain and thermal effect on high performance solid-state lasers[D]. Xi'an: Xidian University, 2018.
- [21] 屈鹏飞. 紧凑型高效能固体激光器关键技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017.
- QU Pengfei. Research on key technology of compact high performance solid-state laser[D]. Xi'an: Xidian University, 2017.
- [22] 朱江涛. 基于 Nd: YAG 热透镜效应的调 Q 激光器研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2022.
- ZHU Jiangtao. Study on Q-switched laser based on Nd: YAG thermal lens effect[D]. Xi'an: Xidian University, 2022.
- [23] 史策. 热传导方程有限差分法的 MATLAB 实现[J]. *咸阳师范学院学报*, 2009, 24(4): 27-29.
- SHI Ce. Heat conduction equation finite difference method to achieve the MATLAB[J]. *Journal of Xianyang Normal University*, 2009, 24(4): 27-29.