

谐振腔失谐对二极管泵浦 Nd:YAG 激光器性能的影响

蒙裴贝, 史文宗, 颜凡江, 李 旭

(北京空间机电研究所, 北京 100094)

摘要: 理论和实验研究了激光器谐振腔失谐对激光器性能的影响。一方面, 理论上, 基于准连续二极管泵浦、电光调 Q 固体激光器的特点, 建立了包含谐振腔失谐修正函数的速率方程模型。通过数值仿真, 模拟了不同激光模式、光斑半径、孔阑半径、孔阑位置情况下, 谐振腔失谐对激光器损耗以及激光性能的影响。另一方面, 实验测量了谐振腔失谐对激光器性能的影响。对于长 250 mm、最小孔阑半径 3.5 mm 的凹凸非稳腔, 凹面全反镜失谐比凸面输出镜失谐对激光器性能的影响大, 当凹面全反镜水平方向失谐角度由 0 增加到 490 μrad 时, 激光能量由 220 mJ 下降到 150.9 mJ, 下降 31.4%, 脉冲宽度由 5 ns 增大到 6.5 ns, 实验结果和理论分析结果基本相符, 说明激光模型的正确性。建立的模型与实验方法为预测激光器谐振腔失谐对激光器性能的影响提供了一种有效工具, 为高可靠性激光器设计提供了依据。

关键词: 谐振腔失谐; 速率方程; 可靠性; Nd:YAG

中图分类号: TN248.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0605001

Influence of resonator misalignment on performance of diode-pumped Nd:YAG laser

Meng Peibei, Shi Wenzong, Yan Fanjiang, Li Xu

(Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China)

Abstract: The influence of laser resonator misalignment on laser performance was investigated theoretically and experimentally. In theory, based on the character of quasi-continuous diode-pumped electro-optical Q-switched solid-state laser, the rate equation model including the modifying function of cavity misalignment was set up. The influence of cavity misalignment on laser losses and laser performance was simulated with different laser modes, laser beam radius, radius of iris and position of iris and the influence of cavity misalignment on laser performance was simulated by model's numerical simulation. On the other hand, the influence of resonator misalignment on laser performance was measured in experiment. For the concave-convex cavity with cavity length of 250 mm and iris radius of 3.5 mm, the influence of concave mirror's misalignment on laser performance was more serious than that of the convex mirror's misalignment. The energy decreased from 220 mJ to 150.9 mJ corresponding to decreasing of 31.4% and pulse width increased from 5 ns to 6.5 ns with the concave mirror's misalignment angle increasing from 0 to 490 μrad . The experimental results and theoretical results are in

收稿日期: 2016-10-10; 修订日期: 2016-11-20

作者简介: 蒙裴贝(1987-), 女, 工程师, 硕士, 主要从事航天固体激光器设计技术方面的研究。Email: pbmeng@163.com

good agreement, indicating the validity of the laser model. The established laser model and the utilized experimental measuring method can be effective means to obtain the influence of resonator's misalignment on laser performance, which can be a reference of the design of high reliability laser.

Key words: resonator misalignment; rate equation; reliability; Nd:YAG

0 引 言

LD 泵浦的全固态激光器结构紧凑、效率高、稳定好、寿命长,在星载激光雷达和空间光电对抗等领域内有广泛的应用^[1-7]。由于空间环境的特殊性,空间应用的激光器不仅要满足性能指标要求,还要满足可靠性要求。激光谐振腔是激光器实现激光能量提取和输出的关键。谐振腔失谐使光束发生横向偏移或角倾斜,导致激光器输出能量下降、光束质量变差、光束指向变化,严重时激光器失效,因此激光器失谐是激光器最重要的可靠性因素之一。一定外部环境下,提高激光器的失谐可靠性主要从两方面着手,一是降低谐振腔的失调灵敏特性,即降低腔镜失调对激光性能的影响,如优化谐振腔设计,采用 Porror 棱镜谐振腔^[8];二是提高谐振腔的稳定性,即降低环境扰动对谐振腔腔镜不对准的影响,如优化激光器结构设计^[9]。无论何种方式,均以谐振腔失谐与激光器性能的关系为基础,因此,进行谐振腔失谐对激光器性能的影响研究具有重要意义。目前关于谐振腔失谐的研究主要集中于谐振腔失调灵敏度的定性分析^[10],谐振腔失谐对激光光场分布和相位影响的分析^[11-12],而针对激光器重要输出特性,如激光系统应用最为重要的,激光器设计时最为关注的能量和脉冲宽度,鲜有谐振腔失谐对其影响的定量分析。

文中以应用最为广泛的准连续二极管泵浦 Nd:YAG 电光调 Q 激光器为例建立速率方程模型,加入腔镜失谐修正函数,分析了谐振腔失谐对激光器重要输出特性的影响,并进行了实验验证。

1 仿真模型的建立

1.1 速率方程

不考虑下能级粒子数,1 064 nm Nd:YAG 激光器的四能级速率方程为^[13]:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{\eta_s \eta_a \eta_o \eta_B \eta_T P_p}{V_g h \nu_l} - \gamma c \sigma_{em} \Phi N - \frac{N}{\tau_f} \quad (1)$$

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{2\sigma_{em} N_l \Phi}{t_r} - \frac{\Phi}{t_c} \quad (2)$$

式中: N 为上能级粒子数密度; Φ 为腔内光子数密度; η_s 为斯托克斯因子,满足 $\eta_s = \lambda_p / \lambda_l$; λ_p 和 λ_l 分别为泵浦光波长和激光波长; η_a 和 η_o 分别为晶体对泵浦光的吸收效率和量子效率; η_B 和 η_T 分别为光束匹配效率和泵浦透射效率; $h\nu_l$ 为激光光子能量; h 为普朗克常量; ν_l 为激光频率,满足 $\nu_l = c / \lambda_l$; c 为光速; γ 为简并因子; σ_{em} 为受激发射截面; τ_f 为上能级寿命; l_g 为增益介质长度; V_g 为增益体积; P_p 为泵浦功率。准连续泵浦模式下,假设泵浦脉冲为重复频率 f ,宽度 τ_p 和峰值功率 P_{p0} 的矩形脉冲,一个周期内 P_p 满足:

$$P_p(t) = \begin{cases} P_{p0}, & 0 \leq t \leq \tau_p \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (3)$$

光子寿命 t_c 为:

$$t_c = \frac{t_r}{\delta} = \frac{2L/c}{\ln(1/R_{out}) + \delta_c + \delta_o} \quad (4)$$

式中: t_r 为光子往返时间,满足 $t_r = 2L/c$, L 为谐振腔的光学长度; δ 为谐振腔损耗,包括 3 部分:输出镜对 1 064 nm 部分反射(反射率为 R_{out})引入的损耗, Q 开关引入损耗 δ_o ,剩余损耗 δ_c 。对于由偏振片、1/4 波片和电光晶体组成的加压式电光调 Q 激光器, δ_o 满足:

$$\delta_o = -2 \ln \left\{ \frac{1}{2} \left[1 + \sin \left(\pi \frac{V_o}{2V_{M4}} \right) \right] \right\} \quad (5)$$

式中: V_o 为加载在电光晶体上的开关电压; V_{M4} 为 1/4 波电压。假设 V_o 为频率为 f 的矩形脉冲,脉宽为 τ_q ,峰值电压为 V_{o0} ,泵浦脉冲下降沿与开关电压上升沿重合,一个周期内 V_o 满足:

$$V_o(t) = \begin{cases} V_{o0}, & \tau_p \leq t \leq \tau_p + \tau_q \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (6)$$

激光器输出脉冲功率 $P(t)$ 和能量 E 满足:

$$P(t) = \frac{h\nu_l A L \ln(1/R_{out})}{t_r} \Phi(t) \quad (7)$$

$$E = \int_0^\infty P(t) dt \quad (8)$$

式中： A 为激光束的截面。假设腔内激光半径 ω_l 变化很小， ω_l 为常数， A 满足 $A=\pi\omega_l^2$ 。根据 $P(t)$ 可以得到激光脉冲宽度 τ_l (峰值半高全宽, FWHM)。

1.2 谐振腔失谐修正函数

谐振腔剩余损耗包括衍射损耗、非激活吸收、散射等其他损耗。后者由谐振腔以及腔内光学元件决定，与谐振腔失谐无关。衍射损耗是光在腔内往返传播时，因腔镜、腔内元件边缘或者孔径的衍射效应而产生的损耗。谐振腔失谐时会导致光束传输变化，进而导致衍射损耗变化。利用菲涅耳-基尔霍夫衍射积分公式，拉盖尔-高斯光束通过有限尺寸光阑的衍射损耗为^[14]：

$$\delta_{pl} = 1 - \frac{\int_0^{\infty} \left(\frac{2r^2}{\omega_0^2} \right) \left[L_p^l \left(\frac{2r^2}{\omega_0^2} \right) \right]^2 e^{-\frac{2r^2}{\omega_0^2}} \begin{cases} \cos^2 l\varphi \\ \sin^2 l\varphi \end{cases} r dr d\varphi}{\int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{2r^2}{\omega_0^2} \right) \left[L_p^l \left(\frac{2r^2}{\omega_0^2} \right) \right]^2 e^{-\frac{2r^2}{\omega_0^2}} \begin{cases} \cos^2 l\varphi \\ \sin^2 l\varphi \end{cases} r dr d\varphi} \quad (9)$$

式中： ω_0 为光阑处的 p 、 l 阶的高斯模式光斑半径，以光斑中心作为坐标原点，当光阑为半径 r_0 的圆形孔阑时，面积积分区域 S 满足，

$$(x+\Delta_x)^2 + (y+\Delta_y)^2 \leq r_0^2 \quad (10)$$

式中：极坐标中 $x=r\cos\varphi$, $y=r\sin\varphi$, $\Delta_j, j=x, y$, 分别对应孔阑处的 x 和 y 方向的失调线位移, x 方向为水平方向, y 方向为俯仰方向, 后续关于 j 的定义类似。类似的, 对于 x 、 y 方向尺寸分别为 b_x 和 b_y 的方形光阑的情况, S 满足: $|x+\Delta_x| \leq b_x/2$, $|y+\Delta_y| \leq b_y/2$ 。如图 1 所示, 腔长为 L 的谐振腔由全反镜 M_1 和输出镜 M_2 组成, M_1 曲率半径为 R_1 , 面向腔内表面镀振荡光高反射膜 (反射率 $\geq 99.9\%$), M_2 曲率半径为 R_2 , 面向腔内表面镀振荡激光部分反射膜, 另一面表面镀振荡激光减反射膜。对凹面镜曲率半径取正值, 对凸面镜曲率半径取负值。以谐振腔内通光孔径最小的光学元件作为光阑, 其与 M_1 的距离为 L_1 。 M_1 和 M_2 失谐角度可以分解为 x 方向和 y 方向, 分别为 θ_{1j} 和 θ_{2j} , M_1 球面曲率中心由 O_{1j} 变为 O_{1j}' , M_2 球面曲率中心由 O_{2j} 变为 O_{2j}' , O_{ij}' ($i=1,2$, 分别为 M_1 和 M_2 对应的物理量, 后续关于 i 的定义类似) 在 $O_{1j}O_{2j}$ 上方, θ_{ij} 为正, 反之为负, 则谐振腔的光轴由 $O_{1j}O_{2j}$ 变为 $O_{1j}'O_{2j}'$, 用 β_j 表示前后两光轴之间的夹角, 当 θ_{1j} 和 θ_{2j} 很小时, β_j 满足:

$$\beta_j = \frac{O_{1j}O_{1j}' - O_{2j}O_{2j}'}{O_{1j}O_{2j}} = \frac{\theta_{1j}R_1 - \theta_{2j}R_2}{L - (R_1 + R_2)} \quad (11)$$

Δ_j 满足:

$$\Delta_j = \theta_{1j}R_1 + (R_1 - L_1)\beta_j \quad (12)$$

引入谐振腔失谐修正函数 δ_c 。忽略非激活吸收、散射的影响, δ_c 满足:

$$\delta_c = \delta_{pl}(\theta_{1x}, \theta_{1y}, \theta_{2x}, \theta_{2y}) \quad (13)$$

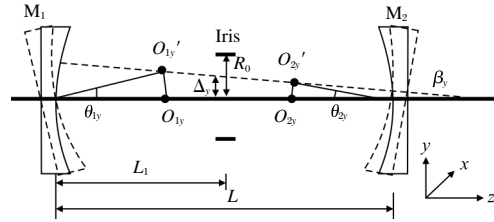


图 1 谐振腔 y 方向失调示意图

Fig.1 Diagram of cavity misalignment in y direction

2 谐振腔失谐损耗模拟仿真

通常, 谐振腔内激光晶体的通光孔径最小, 因此文中讨论以激光晶体半径为孔阑半径, 即 $r_0=r_c$, 晶体中心位置为孔阑位置, 激光光束半径在腔内变化不大, $\omega_0=\omega_1$ 。需要指出的是, 腔内光学元件的通光孔径足够大时, 则视 M_1 或 M_2 为光阑, $L_1=0$ 或 L , 光阑的形状与尺寸由 M_1 或 M_2 的形状与尺寸决定。

根据 1.2 节的讨论, θ_{ij} 通过影响 Δ_j , 进而影响 δ_{pl} , 而 θ_{ij} 对 Δ_j 的影响与谐振腔参数 (R_1 、 R_2 、 L)、孔阑位置 L_1 有关。由于 R_1 、 R_2 、 L 影响 ω_l , 文中重点不在于求解谐振腔光斑半径, 而是对于满足光学指标要求的谐振腔进行失谐分析, 进而优化谐振腔的设计并为激光器的工程设计提供依据与参考, 因此不对显著影响光斑模式的 R_1 、 R_2 、 L 对谐振腔失谐的影响进行讨论。热效应不显著时, L_1 对 ω_l 的影响可以忽略, $R_1=1.5\text{ m}$, $R_2=-1\text{ m}$, $L=250\text{ mm}$, $r_c=3.5\text{ mm}$, $\omega_1=3\text{ mm}$, $\theta_{ij}=500\text{ }\mu\text{rad}$ 时, L_1 对 Δ_j 的影响如图 2 所示。可以看出: Δ_j 与 L_1 呈线性关系, 且孔阑位置越靠近 M_2 , Δ_j 绝对值越小, 且对于同一孔阑位置, M_1 失谐比 M_2 失谐对应的 Δ_j 绝对值大, 典型地, 取 $L_1=190\text{ mm}$, M_1 或 M_2 失谐与 Δ_j 的关系如图 3 所示。可以看出: Δ_j 与 θ_{ij} 成正比关系, θ_{ij} 的绝对值越大, Δ_j 的绝对值越大。

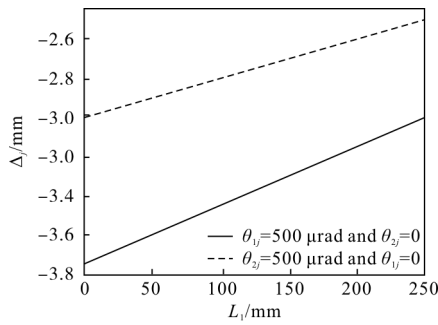


图 2 L_1 对 Δ_j 的影响

Fig.2 Influence of L_1 on Δ_j

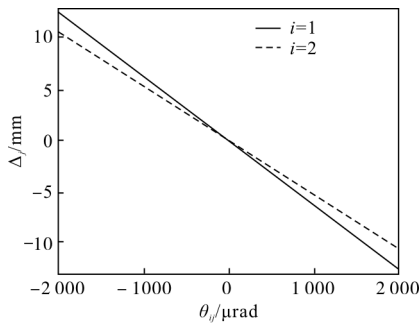


图 3 谐振腔失调(θ_{ij})对 Δ_j 的影响

Fig.3 Influence of cavity misalignment (θ_{ij}) on Δ_j

Δ_j 对衍射损耗的影响与 r_c 、 ω_l 以及激光模式有关。在以上谐振腔参数下, $r_c=3.5$ mm, $\omega_l=3$ mm 时, 不同激光模式对应的衍射损耗与 Δ_j 的关系如图 4 所示。可以看出, 不同激光模式的衍射损耗不同, 且随 Δ_j 的变化趋势不同, 变化趋势与光斑分布有关。当激光光斑分布中心对称时, 如 00 模、10 模和 02 模, Δ_x 和 Δ_y 对衍射损耗的影响相同, 反之, 如 01 模, Δ_x 和 Δ_y 对衍射损耗的影响不同。当光斑存在节数时, 衍射损耗随 Δ_j 的变化存在缓变区, 如 01 模在 x 方向存在节数, 则 x 方向失谐对 δ_{10} 的影响存在缓变区。对于光强度沿着径向减小的模式, 如 00 模、01 模、02 模, 衍射损耗随着 Δ_j 的增大而增大。而对于

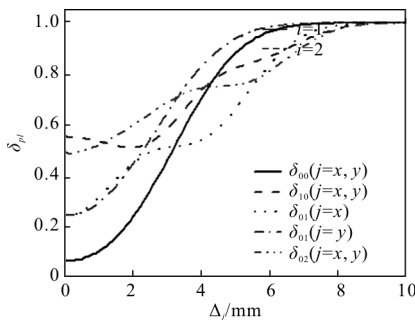


图 4 Δ_j 对 δ_{pi} 的影响

Fig.4 Influence of Δ_j on δ_{pi}

10 模, 光强度在径向有两个峰, 由于 3.5 mm 小于第二个峰对应的半径, Δ_j 较小 (≤ 1.9 mm) 时, 通过孔阑的光束强度没有减小, 因此 δ_{10} 随着 Δ_j 的增大而减小, 而 $\Delta_j > 1.9$ mm 时, δ_{10} 随着 Δ_j 的增大而增大。

由于 Δ_j 与 θ_{ij} 成正比关系, 因此, θ_{ij} 对衍射损耗的影响趋势与 Δ_j 对衍射损耗的影响趋势相同, 不同激光模式的衍射损耗随 θ_{ij} 的变化如图 5 所示。

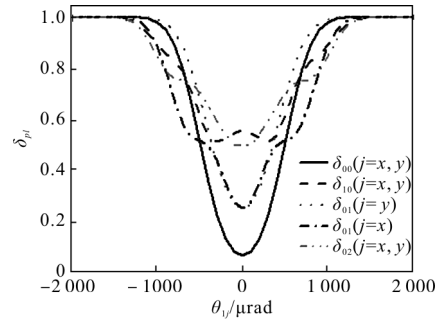


图 5 不同激光模式的衍射损耗随 θ_{ij} 的变化

Fig.5 Diffraction loss of different laser modes versus θ_{ij}

而 M_1 x 方向和 y 方向失谐对 δ_{00} 的影响, 如图 6 所示。可以看出, x 和 y 方向同时失谐对 δ_{00} 的影响相当于 x 方向和 y 方向失谐的加权叠加。

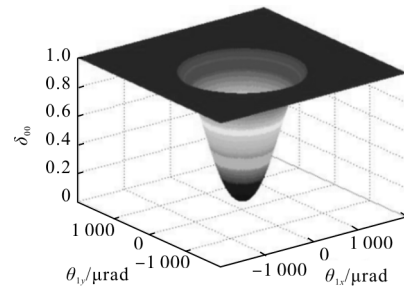


图 6 θ_{ix} 和 θ_{iy} 对 δ_{00} 的影响

Fig.6 Influence of θ_{ix} and θ_{iy} on δ_{00}

实际情况中, ω_l 不大于 r_c , 以 00 模和 10 模 (光强度分布中心对称) 为例, 不同 ω_l 和 r_c 情况下, M_1 失谐与衍射损耗的关系如图 7 所示。可以看出, $\omega_l/r_c=1$ 时, 无失谐情况下, δ_{00} 和 δ_{10} 相同, 谐振腔失谐时, r_c 越大, δ_{00} 和 δ_{10} 越小。 $\omega_l/r_c < 1$ 时, 对于相同的 r_c , θ_{ij} 在一定范围内, ω_l 越小, δ_{00} 和 δ_{10} 越小, θ_{ij} 超过该范围时, ω_l 越小, 失谐对应的 δ_{00} 和 δ_{10} 越大。对于 δ_{00} 和 δ_{10} 该范围分别为 ± 600 μ rad 和 ± 820 μ rad; 对于相同的 ω_l , r_c 越大, 失谐对应的 δ_{00} 和 δ_{10} 越小。对于径向存在节数的激光模式 (如 10 模), ω_l/r_c 的大小会影响衍射损耗随 θ_{ij} 的变化趋势, 当 r_c 大于第二个峰对应的

半径时(如 $\omega_i=2.5\text{ mm}$, $r_c=3.5\text{ mm}$ 和 $\omega_i=3\text{ mm}$, $r_c=4\text{ mm}$), M_1 失谐引起通过光阑光束强度的减小, δ_{10} 随着 θ_{ij} 的增大而增大,反之如上文 Δd_{ij} 对 δ_{10} 的影响分析, δ_{10} 随 θ_{ij} 的增大先减小后增大。

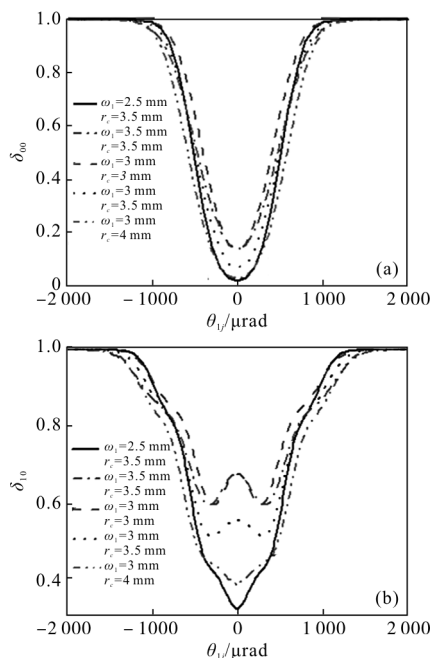


图 7 不同 ω_i 和 r_c 下, θ_{ij} 对衍射损耗的影响

Fig.7 Influence of θ_{ij} on diffraction loss with different ω_i and r_c

3 谐振腔失谐对激光性能的影响

实验装置如图 8 所示。Nd:YAG 晶体长度为 90 mm, 掺杂浓度为 1.1at%, 直径为 7 mm。晶体端面镀 1 064 nm 增透膜(反射率 $<0.1\%$), 并通过钢箔包裹置于热沉上。激光二极管阵列通过热电制冷器制冷并保持温度在 293 K 以使之工作在 808 nm, 与 Nd:YAG 晶体吸收峰匹配。由于晶体侧面未镀膜, 泵浦光透过率(η_T)约为 95%。二极管阵列交叉分布在晶体周围以获得均匀的增益分布, 其慢轴和快轴发散角分别为 10° 和 40° (FWHM), 通过 Zemax 光学设计软件计算 Nd:YAG 对泵浦光的吸收效率 (η_a) 约为 80%, 泵浦长度即增益介质长度(l_g)约为 60 mm, 增益体积(V_g)为 $\pi r_c^2 l_g$ 。在 LD 驱动模块驱动下, 激光二极管阵列输出重复频率(f)为 3Hz, 泵浦宽度(τ_p)为 210 μs , 峰值功率(P_{p0})为 6 000 W 的泵浦光脉冲。Q 开关由偏振片、 $\lambda/4$ 波片和 KD*P 晶体组成。调 Q 驱动模块为 KD*P 晶体提供 3 kV 开关电压(V_{Q0}), 约为 KD*P 晶体 $\lambda/4$ 波电压(V_{M4})。泵浦功率脉冲和开关电压脉冲

的时序通过延时电路控制。谐振腔由 M_1 和 M_2 组成, M_1 曲率半径 R_1 为 1.5 m, 对 1 064 nm 反射率大于 99.9%, M_2 曲率半径 R_2 为 -1 m, 对 1 064 nm 反射率(R_{out})为 20%, 谐振腔长(L)为 250 mm。晶体中心距 M_1 的距离为 190 mm, 在 M_1 或者 M_2 的镜架上安装平面镜。谐振腔无失谐情况下, 距离平面镜 L_0 处的 He-Ne 光准直后垂直入射到平面镜。在 He-Ne 光出光口处放置与出光方向垂直的分划板, 分别调整 M_1 或 M_2 的镜架, 使其失谐, 记录分划板上返回 He-Ne 光与出射 He-Ne 光的距离 Δd_{ij} 以及输出的激光能量和脉冲宽度。由于 M_1 或 M_2 偏转角度 θ_{ij} 很小, 根据几何关系, θ_{ij} 满足 $\theta_{ij}=\text{atan}(\Delta d_{ij}/L_0)/2$ 。

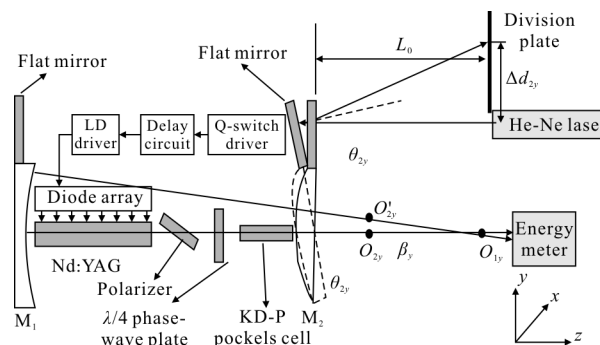


图 8 实验装置示意图

Fig.8 Diagram of experimental setup

根据激光强度分布, 假设激光模式为 00 模, 基于实参数和其他参数(见表 1), 模拟 M_1 和 M_2 失谐对激光器输出能量和脉冲宽度的影响, 结果如图 9 和图 10 所示。可以看出: 理论分析结果和实验结果基本一致, M_1 和 M_2 失谐角度增大, 能量减小, 脉冲宽度增大, 同时变化速率增大, 说明了理论模型的正确性, 而理论和实验结果存在的差异性主要源于激光模式不是严格的 00 模, 泵浦脉冲和调 Q 脉冲不是严格的矩形脉冲, 同时可以看出: x 方向和 y 方向失谐特性有一定差异, 这是因为激光光斑有一定的椭圆度。需要说明的是: 脉冲宽度的测量精度不高, 约为 1 ns, 但是足以反映变化趋势。另外, M_1 失谐对激光能量和脉冲宽度的影响比 M_2 失谐对激光能量和脉冲的影响大。这与图 3 和图 4 中的损耗分析结果相同, 相同失谐角下, M_1 失谐对应的损耗比 M_2 失谐对应的损耗大, 损耗大对应的能量小, 脉冲宽度大。 M_{1x} 方向失谐时, θ_{ix} 由 0 变化到 490 μrad 和 -553 μrad 时, 能量由 220 mJ 分别下降到 150.9 mJ 和 151 mJ, 脉冲宽度由 5 ns

分别增大到 6 ns 和 6.3 ns。y 方向失谐时, θ_y 由 0 变化到 546 μrad 和 -491 μrad 时, 能量由 220 mJ 分别下降到 151.4 mJ 和 152.5 mJ, 脉冲宽度由 5.2 ns 分别增大到 6.5 ns 和 6.2 ns。 M_{2x} 方向失谐时, θ_x 由 0 变化到 600 μrad 和 -600 μrad 时, 能量由 222 mJ 分别下降到 149.9 mJ 和 152.2 mJ, 脉冲宽度由 5.5 ns 分别增大到 5.7 ns 和 5.8 ns。 M_{2y} 方向失谐时, θ_y 由 0 变化到 553 μrad 和 -611 μrad 时, 能量由 222 mJ 分别下降到 151.3 mJ 和 154 mJ, 脉冲宽度由 5.1 ns 分别增大到 6 ns 和 5.9 ns。

表 1 仿真参数

Tab.1 Parameters for simulation

Parameter	Value
Beam radius (ω)	3 mm (measured)
Simulated emission cross section (σ_{em})	$2.8 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ ^[15]
Upper level lifetime (τ)	230 μs
Plank constant (h)	$6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$
Laser wavelength (λ_l)	1 064 nm
Pump wavelength (λ_p)	8 08 nm
Velocity of light (c)	$3 \times 10^8 \text{ m/s}$
Degeneracy factor (γ)	1
Pump quantum efficiency (η_0)	0.95 ^[15]
Beam match efficiency (η_B)	0.95 ^[15]

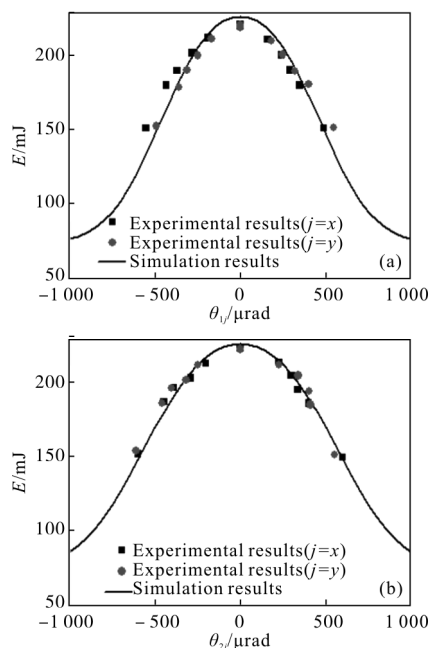


图 9 能量与谐振腔失谐角度的关系

Fig.9 Energy versus resonator misalignment angle

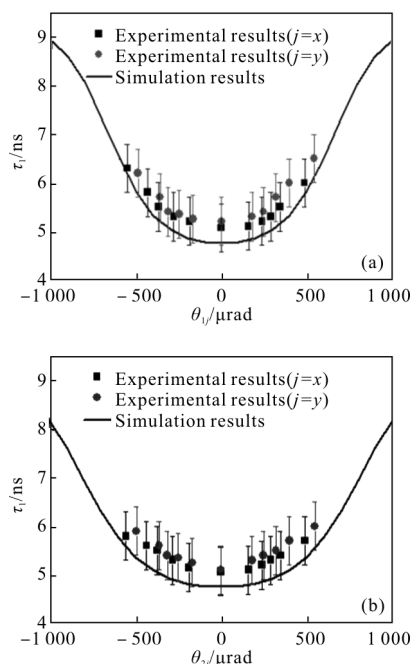


图 10 脉冲宽度与谐振腔失谐角度的关系

Fig.10 Pulse width versus resonator misalignment angle

4 结论

文中对激光器谐振腔失谐对激光器性能的影响进行了理论和实验研究。理论上建立了包含腔镜失谐修正函数的准连续二极管泵浦、电光调 Q 固体激光器速率方程模型, 采用有限差分求解方法, 得出了谐振腔失谐对应的衍射损耗以及激光器输出能量和脉冲宽度的数值解, 分析了不同激光模式、晶体半径、光斑半径、晶体位置下, 谐振腔失谐对谐振腔损耗和激光器输出性能的影响, 为谐振腔设计提供了依据。另外, 实验上测量了谐振腔腔镜失谐对激光器性能的影响, 试验结果和理论分析结果基本相符, 说明激光模型的正确性, 同时为激光器的抗失谐可靠性设计提供了依据。对于曲率半径为 1.5 m 和 -1 m 的凹凸腔, 相比凸面镜, 凹面镜失谐对激光输出特性的影响大。凹面镜水平方向失谐角度为 490 μrad 时, 激光能量由 220 mJ 下降到 150.9 mJ, 下降 31.4%, 脉冲宽度由 5 ns 增大到 6.5 ns。在实验及理论计算中, 仍存在以下几个问题: 在建立激光器模型时, 将泵浦脉冲、调 Q 高压脉冲等效为矩形脉冲、以及激光模式等效为拉盖尔高斯光束有不足之处, 要更精确描述泵浦脉冲、调 Q 高压脉冲和激光模式, 需要实际中采集泵浦脉冲、调 Q 高压脉冲波

形、激光模式数据,优化谐振腔失谐修正函数的计算。

参考文献:

- [1] Meng Peibei, Yan Fanjiang, Li Xu, et al. Influence of boundary condition and pump scheme on thermal effects of laser crystal [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(1): 3216–3222. (in Chinese)
蒙裴贝, 颜凡江, 李旭, 等. 热边界和泵浦结构对激光晶体热效应的影响[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(1): 3216–3222.
- [2] Shi Xiangchun, Chen Weibiao, Hou Xia. Application of all solid state laser in space [J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2005, 34(2): 127–131. (in Chinese)
施翔春, 陈卫标, 侯霞. 全固态激光技术在航天领域的应用[J]. 红外与激光工程, 2005, 34(2): 127–131.
- [3] Song Qingli, Liang Zhipeng, Dong Xue, et al. High repetition rate laser ranging to space debris from Changchun Observatory [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24 (10s): 175–182. (in Chinese)
宋清丽, 梁智鹏, 董雪, 等. 长春站高重复频率空间碎片激光测距技术[J]. 光学精密工程, 2016, 24(10s): 175–182.
- [4] Yan Fanjiang, Zheng Yongchao, Tao Yuliang. Analysis and prospects of laser technology of space-borne range measurement system [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2012, 33(4): 70–77. (in Chinese)
颜凡江, 郑永超, 陶宇亮. 星载激光测距系统中激光器技术分析及发展展望[J]. 航天返回与遥感, 2012, 33(4): 70–77.
- [5] Apollonov V V. High power lasers for space debris elimination [J]. *Chin Opt*, 2013, 6(2): 187–195. (in Chinese)
Apollonov V V. 用于空间碎片清除的高功率激光器[J]. 中国光学, 2013, 6(2): 187–195.
- [6] Li Long, Dong Wuwei, Shi Peng, et al. Thermal effect of diode bar side-pumped Nd:YAG slab [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(11): 2120–2126. (in Chinese)
李隆, 董武威, 史鹏, 等. 激光二极管阵列侧泵浦 Nd:YAG 板条的热效应[J]. 光学精密工程, 2008, 16(11): 2120–2126.
- [7] Zhang Junbin, Huang Zhiyun. Theoretical analysis on threshold of solar pumped solid state lasers [J]. *Chin Opt*, 2016, 9(2): 241–248. (in Chinese)
张俊斌, 黄志云. 太阳光泵浦固体激光器阈值的理论分析[J]. 中国光学, 2016, 9(2): 241–248.
- [8] Cheng Yong. Development and progress of adjust-free solid state laser [J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2006, 35(3): 297–301. (in Chinese)
程勇. 免调试固体激光器研究与进展 [J]. 红外与激光工程, 2006, 35(3): 297–301.
- [9] Yu A W, Stephen M A, Li S X, et al. Space laser transmitter development for ICESat-2 mission [C]//SPIE, 2010, 7578: 757809.
- [10] Huang Yu, Feng Guoying, Li Wei, et al. Matrix expression for 2-D misalignment sensitivity of complex astigmatic resonator [J]. *Laser Technology*, 2008, 32(5): 460–464. (in Chinese)
黄宇, 冯国英, 李玮, 等. 复杂像散腔的 2 维失调灵敏度的矩阵表示[J]. 激光技术, 2008, 32(5): 460–464.
- [11] Wang Ning, Lu Yutian. Sensitivity to mirror tilt of off-axis hybrid resonator for innoslab [J]. *Chineses Journal of Lasers*, 2005, 32(12): 1593–1598. (in Chinese)
王宁, 陆雨田. 部分端面抽运板条激光器腔镜倾斜问题研究[J]. 中国激光, 2005, 32(12): 1593–1598.
- [12] Sobajima M, Koike H, Yokoyama M, et al. Numerical study of optical-cavity misalignment effects for a far-infrared FEL [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2002, 483(1): 240–244.
- [13] Mercer C J, Tsang Y H, Binks D J. A model of QCW diode pumped passively Q-switched solid state laser [J]. *J Mod Optics*, 2007, 54(12): 1685–1694.
- [14] Lv Baida. Laser Optical Beam Description, Transmission, Transformation and Optical Cavity Technology Physics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2003. (in Chinese)
吕百达. 激光光学光束描述、传输变换与光腔技术物理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- [15] Koechner W. Solid-state Laser Engineering [M]. 6th ed. New York: Springer, 2006.