

高斯镜参数对 LD 泵浦 Nd:YAG 激光器的影响

蒙裴贝, 史文宗, 蒋 硕, 齐 明, 邓永涛, 李 旭

(北京空间机电研究所 中国空间技术研究院空间激光信息感知技术核心专业
实验室, 北京 100094)

摘 要: 实验研究了输出镜为不同参数高斯镜时, 偏心对 LD 泵浦 Nd:YAG 激光器的影响及激光器的输出特性。仅当光轴与激光晶体中心轴、Q 开关中心轴一致, 且经过高斯镜反射率中心时, 可同时实现最大能量、最窄脉冲宽度和最小发散角输出。存在偏心时, 高斯镜反射率半径越小或中心反射率越大, 则能量下降越多, 脉冲宽度和发散角增大越大。对于反射率半径为 2.5 mm 和中心反射率为 30% 的高斯输出镜, 偏心 0.5 mm 时, 能量降低 7%, 脉冲宽度增宽 33%, 发散角增大 20%。激光性能方面, 高斯镜反射率半径越小或中心反射率越小, 光束质量越好, 但效率低。综合考虑偏心影响和激光性能, 反射率半径为 2.75 mm 和中心反射率为 20% 的高斯镜作为输出镜最佳。泵浦能量为 984 mJ 时, 获得了能量 128 mJ, 脉冲宽度 7.3 ns, 光束质量 M^2 因子约 4.6 的 1064 nm 激光输出, 对应光光转换效率为 13%。实验结果为激光器设计和装调提供了参考。

关键词: 固体激光器; Nd:YAG; 高斯镜

中图分类号: TN248.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20200127

Influence of Gaussian mirror parameters on LD-pumped Nd:YAG laser

Meng Peibei, Shi Wenzong, Jiang Shuo, Qi Ming, Deng Yongtao, Li Xu

(Key Laboratory for Space Laser Information Perception Technology of CAST, Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity,
Beijing 100094, China)

Abstract: The influence of eccentricity and laser performance of LD-pumped Nd:YAG laser was investigated experimentally at different parameter Gaussian mirrors. Largest energy, narrowest width and smallest divergence can be obtained simultaneously only when the optical axis, laser crystal axis and Q-switch axis were in agreement, furthermore the optical axis went through the reflectivity center of Gaussian mirror. When eccentricity appeared, the energy, pulse width and divergence degraded more with smaller reflectivity radius or larger center reflectivity of Gaussian mirror. For 2.5 mm reflectivity radius and 30% central reflectivity Gaussian mirror, energy decreased 7%, pulse width increased 33%, and divergence increased 20% under 0.5 mm eccentricity. For laser performance, the smaller the reflectivity radius or center reflectivity of Gaussian mirror, the better the beam quality and the smaller the optical-to-optical efficiency. Considering the eccentricity influence and laser performance, 2.75 mm reflectivity radius and 20% center reflectivity Gaussian mirror was optimum. When the pump energy was 984 mJ, output energy of 128 mJ, pulse width of 7.3 ns, and beam quality M^2 factor of 4.6 at 1064 nm were achieved, corresponding to the optical-to-optical efficiency of 13%. The experimental results in this paper can be a reference of the laser design and alignment.

Key words: solid-state laser; Nd:YAG; Gaussian mirror

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,在星载激光雷达领域有广泛的应用^[1-5]。星载激光雷达由于作用距离远,且接收口径受限,激光器能量通常为几十毫焦至百毫焦,同时为了获得高的测量精度,通常采用扩束镜头压缩激光器输出的发散角至几十至百微弧度。当激光器光束质量越好时,相同束腰情况下,发散角越小,则扩束镜头的扩束倍率越小,扩束镜头的口径和激光雷达系统体积越小,因此高光束质量是星载激光器的发展趋势。相对端面泵浦,侧面泵浦更容易注入高的泵浦功率,获得大能量输出。但侧面泵浦时,激光增益模式大,要实现高光束质量输出,需要采用大体积基模谐振腔。非稳腔具有良好的空间选模特性,能产生大体积基模。然而传统硬边镜非稳腔由于输出镜中心镀全反膜,边缘镀增透膜,其基模衍射损耗较大,输出光束近场为环状光斑,远场光斑有衍射环,能量分布分散,不利于应用。高斯镜沿径向渐变的反射率轮廓减少了光学谐振腔的边缘衍射效应,一定程度上消除了输出光束近场的衍射纹波,抑制了远场的旁瓣,改善了空间模式。但由于高斯镜的反射率中心无法引出和测量,光轴和反射率中心的对准只能通过结构设计和装调保证,易出现反射率中心与光轴的偏离(简称“偏心”)。目前关于高斯镜非稳腔的研究主要集中于模式分析^[6-8]及激光器实验^[9-11],没有对不同高斯镜参数下,激光器的输出特性及偏心的影响进行系统性的研究,而这对于激光器设计和装调是极有意义的。

为了研究高斯镜参数对激光器的影响,文中设计了凹凸结构的非稳腔,搭建 LD 泵浦 Nd:YAG 电光调 Q 激光器,实验对比了不同高斯镜参数下,偏心对激光器输出特性的影响和激光器的输出特性。

1 实验装置

实验装置如图 1 所示。Nd:YAG 晶体尺寸为 $\Phi 6 \times 100$ mm,掺杂浓度为 1at.%,端面镀 1064 nm 增透膜(反射率 $<0.1\%$)。Nd:YAG 晶体通过铝箔包裹置于热沉上。12 支激光二极管阵列(LDA)分成 4 沿晶体轴交叉排布,每组的 3 支 LDA 均匀排布在晶体半侧面。每支 LDA 包含 6 个巴条,其慢轴和快轴发散角分别为 10° 和 40° (FWHM)。LDA 安装热沉通过热电

制冷器控温并保持温度在 293 K,以使 LDA 发出光中心波长在 808 nm,与 Nd:YAG 晶体吸收峰匹配。LDA 为脉冲工作模式,脉冲重复频率为 5 Hz,脉冲宽度为 210 μ s,峰值功率可调。电光 Q 开关由偏振片、1/4 波片和 KD*P 普克尔盒组成。谐振腔为凹凸非稳腔,由全反镜 M_1 和输出镜 $M_{2i}(i=1, 2, 3, 4, 5)$ 组成。谐振腔腔长为 265 mm。 M_1 为平凹镜,曲率半径为 2.6 m,内表面镀 1064 nm 高反膜(反射率 $>99.9\%$)。输出镜 M_{2i} 为弯月透镜,第一面曲率半径为 -2 m,第二面曲率半径为 2 m,厚度为 3 mm。第一面的反射率分布为:

$$R(r) = R_0 e^{-2(r/\omega_0)^2} \quad (1)$$

式中: R_0 为中心反射率; r 为距反射率中心的距离; ω_0 为反射率降到峰值的 $1/e^2$ 时的径向距离,后简称“反射率半径”。当 ω_0 为 ∞ 时,即为普通的均匀反射率镜。 M_{2i} 第一面的反射率参数如表 1 所示。 M_{2i} 第二面镀 1064 nm 增透膜(反射率 $<0.1\%$)。 M_{2i} 安装于二维平移台的镜架上,可以调整 M_{2i} X 和 Y 方向的位置和角度。

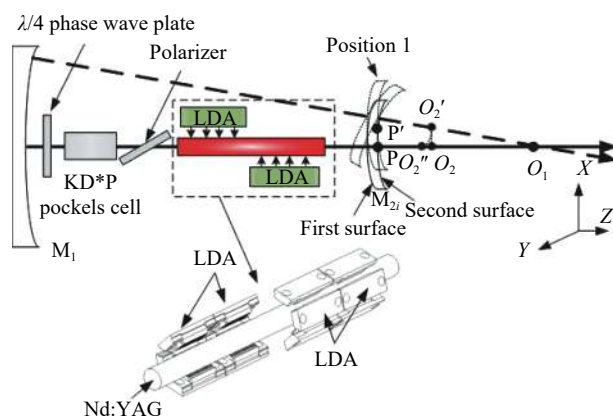


图 1 实验装置示意图

Fig.1 Diagram of experimental setup

表 1 M_{2i} 第一面的反射率参数

Tab.1 Reflectivity parameters of M_{2i} first surface

Parameter	M_{21}	M_{22}	M_{23}	M_{24}	M_{25}
ω_0	2.5 mm	2.75 mm	3 mm	2.75 mm	∞
R_0	30%	30%	30%	20%	30%

2 实验结果

2.1 偏心对激光器性能的影响

如图 1 所示, M_1 曲率中心 O_1 与 M_{2i} 曲率中心

O_2 的连线作为光轴, M_{2i} 的反射率中心与 O_1O_2 偏离称为偏心。

由于高斯镜的反射率中心无法确定, 因此, 于 M_{2i} 不同位置处, 对激光器分别按照最大能量 (简称 state1) 和最小脉冲宽度 (简称 state2) 进行准直, 并用采用能量计 (探头型号: Ophir PE50-DIF-ER-C) 测试激光输出能量 (E_{out}), 采用光电探测器 (型号: Thorlabs DET025A, 上升时间 150 ps) 和示波器 (型号: Keysight DSO9104A) 测试脉冲宽度 (τ), 采用平行光管 (焦距 1 m) 和 CCD 相机 (位于平行光管焦面, 型号: Spiricon SP620) 测量远场光斑分布和发散角 (θ)。为了减小测试误差影响, 采用多次测试取平均值进行数据处理。实验发现, 输出镜为 M_{25} 时, 在确保有效通光的任意位置, 通过调整输出镜角度可以实现最大能量和最窄脉冲宽度同时输出; 而输出镜为 M_{21} , M_{22} , M_{23} , M_{24} 时, 存在最佳位置 (如表 2 所示), 在该位置可以同时实现最大能量和最窄脉冲宽度输出。

表 2 输出镜最佳位置

Tab.2 Best position of output mirror

Direction	M_{21}	M_{22}	M_{23}	M_{24}
X	3.8 mm	3.6 mm	3.7 mm	3.7 mm
Y	5.1 mm	5 mm	3.7 mm	5.3 mm

以 X 方向为例, 泵浦能量 (E_{pump}) 为 856 mJ, 且 M_{2i} 在 Y 方向位于最佳位置时, state1 和 state2 两种准直状态下, X 方向位置对输出能量和脉冲宽度的影响如图 2 所示。可以看出, 偏离最佳位置越多, 即偏心量越大, 则能量越小, 脉冲宽度越宽。相同偏心量情况下, ω_0 越大或 R_0 越小, 则偏心影响越小。 X 方向偏心量 (Δ_x) 为 0.5 mm 时, 能量和脉冲宽度情况如表 3 所示。

发散角方面, 以 M_{21} 为例, Y 方向位于 5.1 mm 时, X 方向位置对激光器发散角的影响如图 3 所示。可以看出, 对于 state2, 偏离最佳位置对发散角影响不大, X 由 3.8 mm 变化到 3.3 mm 时, 发散角为 1.18 mrad~1.19 mrad。对于 state1, 发散角随偏心量 (Δ_x) 的增大而增大, X 由 3.8 mm 变化到 3.3 mm 时, 发散角由 1.17 mrad 增大到 1.4 mrad(20%)。远场光斑分布如图 3 所示, 偏离最佳位置时, X 方向的发散角增大。

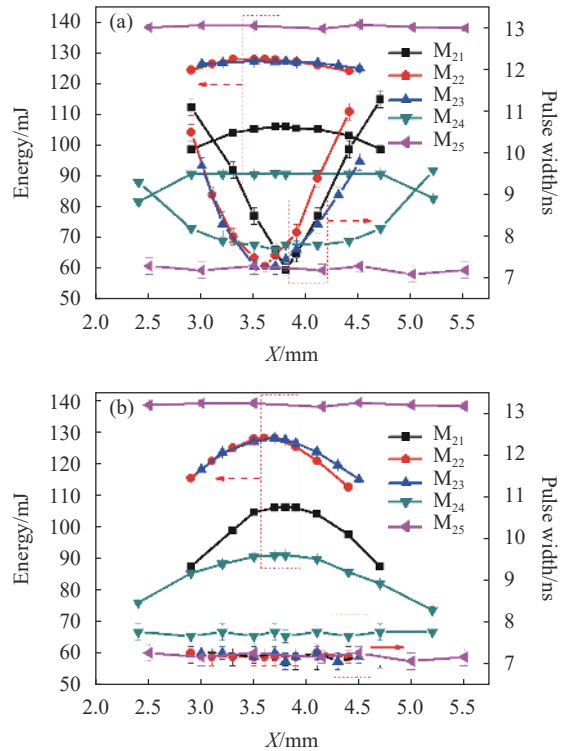


图 2 X 方向位置对能量和脉冲宽度的影响: (a) state1; (b) state2
Fig.2 Influence of X on energy and pulse width: (a) state1; (b) state2

表 3 Δ_x 为 0.5 mm 时的能量和脉冲宽度

Tab.3 Energy and pulse width at $\Delta_x=0.5$ mm

Output mirror	State	Energy/mJ	Pulse width/ns
M_{21}	state1	106.3-104.2	7.2-9.6 (33%)
	state2	106.5-99.1 (7%)	~7.2
M_{22}	state1	128-126.6	7.3-9 (23%)
	state2	128.2-121 (6%)	~7.2
M_{23}	state1	~127	7.3-8.3 (14%)
	state2	128.2-123.6 (5%)	~7.3
M_{24}	state1	~91	7.3-7.9 (3%)
	state2	91.4-88.6 (3%)	~7.7

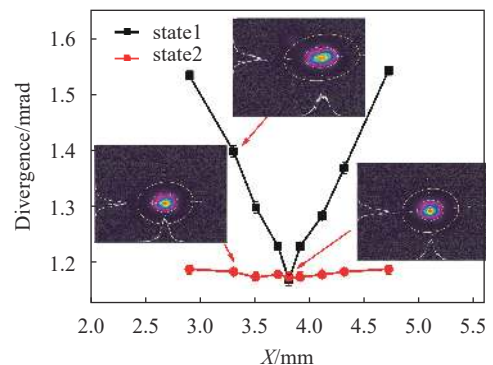


图 3 M_{21} X 方向位置对发散角的影响
Fig.3 Influence of X on divergence for M_{21}

出现上述现象的原因为,一定激光器参数下,当光轴与激光晶体中心轴、Q 开关中心轴一致,且经过高斯镜的反射率中心,即输出镜位于最佳位置时,激光器处于对准状态,能量最大,脉冲宽度最窄,发散角最小。当出现偏心,即输出镜移动至位置 1 时(如图 1 所示),曲率中心由 O_2 移动至 O_2' ,反射率中心由 P 移动至 P'。对于均匀反射率镜 (M_{25}),通过调整输出镜角度将 O_2' 调整至 O_2'' ,光轴则与调整前一致,同时反射率均匀分布,输出特性不受影响。对于高斯镜 (M_{21} 、 M_{22} 、 M_{23} 、 M_{24}),反射率分布不均匀,输出能量受输出镜反射率的影响^[12],脉冲宽度主要由 Q 开关决定,发散角主要由光轴与激光晶体中心轴的匹配决定。因此,输出能量最大 (state1) 时,光轴接近或经过高斯镜的反射率中心,此时与 Q 开关和激光晶体中心轴存在一定角度,因此脉冲宽度和发散角增大;输出脉冲宽度最小 (state2) 时,光轴与 Q 开关中心轴一致,而激光晶体中心轴与 Q 开关中心轴一致,则此时发散角最小,而平均反射率下降,因此输出能量减小。

2.2 激光性能

当 M_{2i} 位于最佳位置时,不同泵浦能量下,对激光器输出能量、脉冲宽度和发散角进行测试,同时在输出镜后 20 mm 处采用 CCD 相机 (型号 Spiricon SP620) 和缩束镜头 (缩束倍率 4 倍) 对近场光斑直径 (D) 进行测试,由于激光器输出光为发散光,近场光斑近似为激光束腰,测试结果如图 4 所示。可以看出,当 R_0 为 30% 时, ω_0 越大,则平均反射率越大,对应的阈值越小。相比 M_{21} 、 M_{22} 和 M_{23} , M_{25} 为输出镜时,激光器的阈值最小。 M_{24} 平均反射率最小,因此, M_{24} 为输出镜时,激光器的阈值最大。斜率效率方面, M_{24} 和 M_{25} 为输出镜时斜率效率最大, M_{21} 为输出镜时,斜率效率最低。随着泵浦能量的增加,发散角和近场光斑逐步增大, M_{25} 增长最快, ω_0 越小,限模作用越明显,发散角和近场光斑直径增长越慢。

相同输出能量时的性能对比如表 4 和图 5 所示。可以看出,相同输出能量下,脉冲宽度类似。 M_{21} 对应的泵浦能量最大,光光效率 (η) 最低 (12.6%),相比 M_{22} 、 M_{23} 和 M_{25} (R_0 相同), θ 和 D 最小,光束质量最好。 M_{25} 为输出镜时,光光效率最高 (16%),但 θ 和

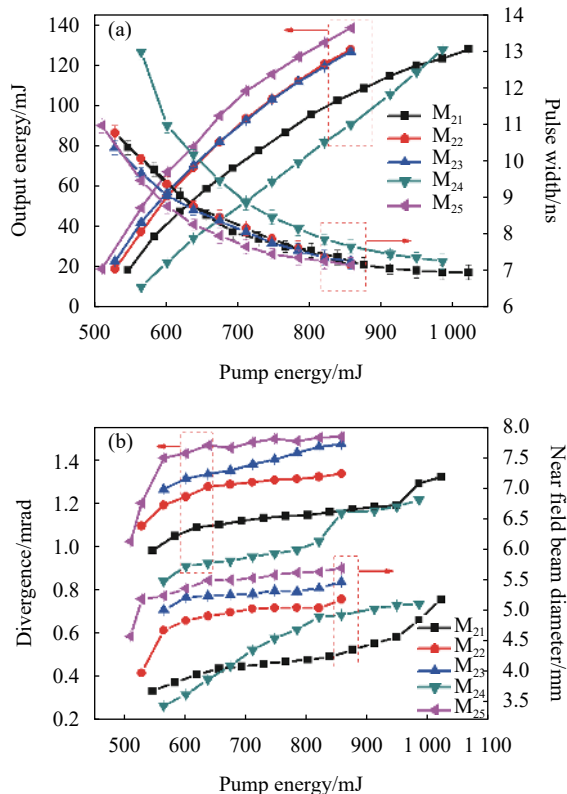


图 4 输出特性对比: (a) E_{out} 和 τ ; (b) θ 和 D

Fig.4 Comparison of output performance: (a) E_{out} and τ ; (b) θ and D

D 最大,光束质量最差。相对 M_{21} , M_{22} 为输出镜时的光束质量接近,但是光光效率明显增大。相比 M_{22} , M_{24} 为输出镜时的光光效率较低 (13%),但是 θ 减少 9%,光束质量较好, M^2 因子约为 4.6,对应的脉宽轮廓和近场光斑分布如图 6 所示。可以看出,脉冲宽度为 7.3 ns, CCD 相机测试光斑直径为 1.28 mm,由于缩束镜头缩束倍率为 4 倍,因此实际光斑直径 D 约为 5.1 mm。

表 4 相同输出能量时的性能

Tab.4 Properties under the same output energy

Parameter	M_{21}	M_{22}	M_{23}	M_{24}	M_{25}
E_{out} /mJ	128.3	128.2	127.2	128	128.1
E_{pump} /mJ	1020	856	856	984	802
η	12.6%	15%	14.9%	13%	16%
τ /ns	7	7.2	7.5	7.3	7.3
θ /mrad	1.31	1.34	1.48	1.22	1.5
D /mm	5.2	5.2	5.5	5.1	5.7

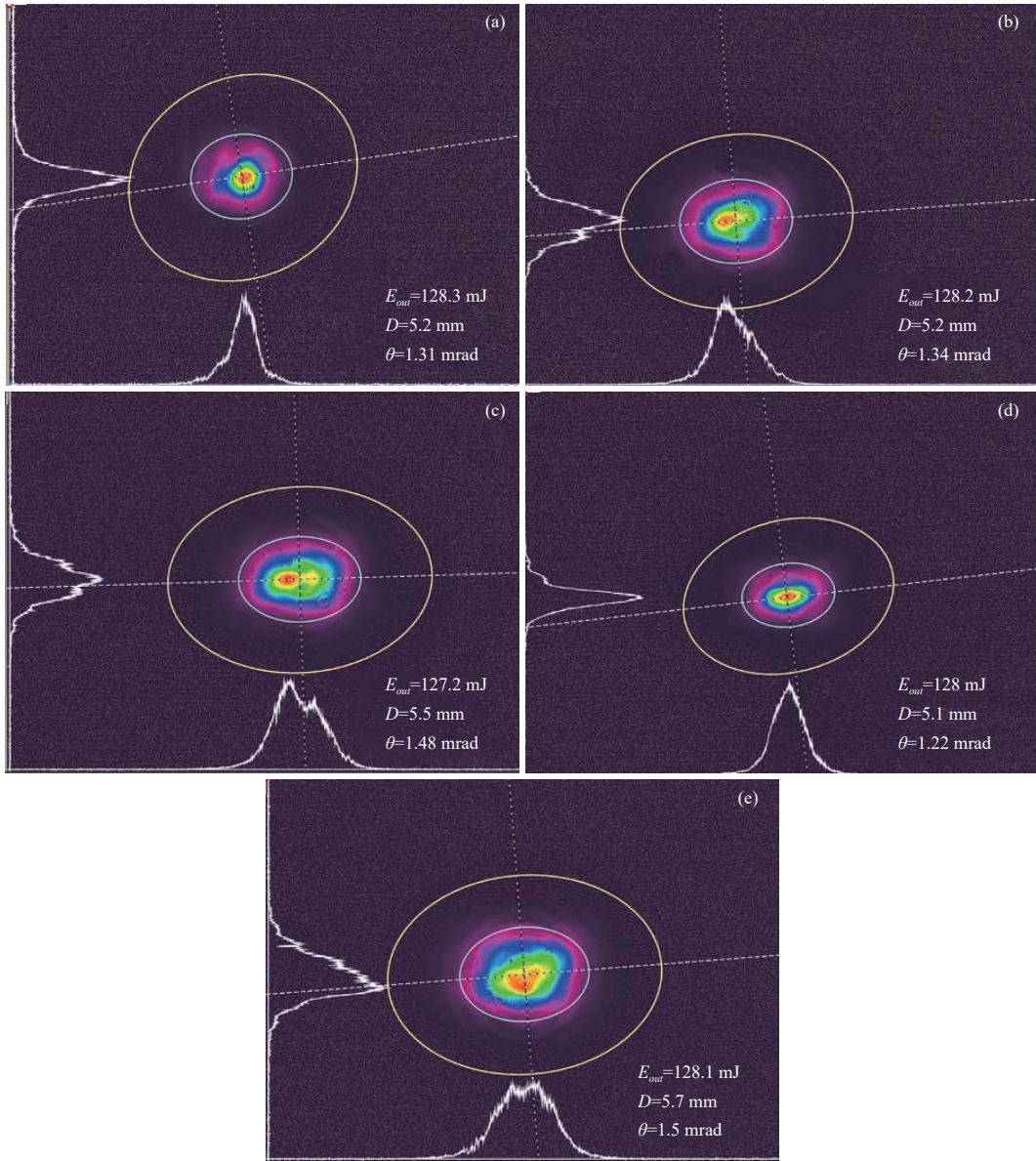


图 5 远场光斑分布: (a)M₂₁; (b)M₂₂; (c)M₂₃; (d)M₂₄; (e)M₂₅

Fig.5 Far field beam distribution: (a) M₂₁; (b) M₂₂; (c) M₂₃; (d) M₂₄; (e) M₂₅

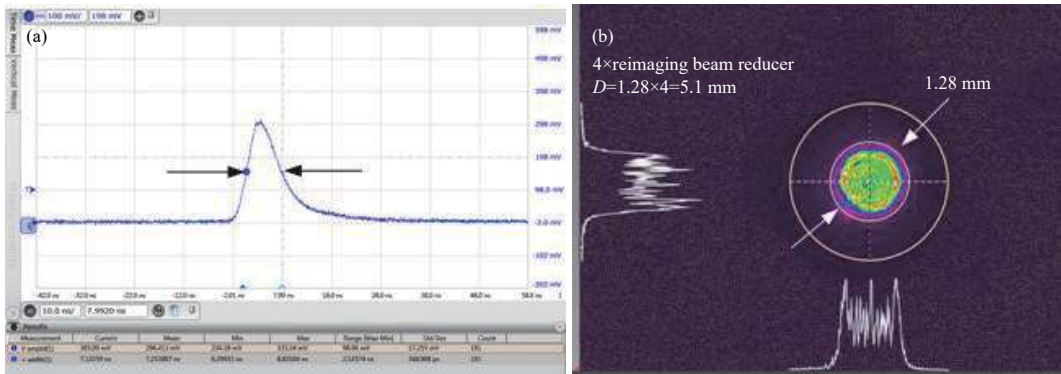


图 6 M₂₄ 为输出镜时的性能: (a) 脉冲轮廓; (b) 近场光斑分布

Fig.6 Performance with M₂₄ as output coupler: (a) pulse trace; (b) near field beam distribution

3 结 论

文中对比了使用不同参数的高斯输出镜时, 高斯镜的偏心量对激光器输出特性的影响及激光器的输出特性。仅当光轴与激光晶体、Q 开关中心轴一致, 且经过反射率中心时, 可同时实现最大能量、最窄脉冲宽度和最小发散角输出。出现偏心时, 高斯镜反射率半径越小或中心反射率越大, 则能量下降越多, 脉冲宽度和发散角增大越大。对于反射率半径为 2.5 mm 及中心反射率为 30% 的高斯输出镜, 偏心 0.5 mm 时, 能量降低 7%, 脉冲宽度变宽 33%, 发散角增大 20%。输出镜反射率均匀分布时, 偏心对激光输出特性影响小。激光性能方面, 相同中心反射率情况下, 高斯镜反射率半径越小, 则激光阈值越大, 光束质量越好, 但是光光效率低。中心反射率对激光阈值及光束质量均有影响。综合考虑偏心影响和激光性能, 反射率半径为 2.75 mm 及中心反射率为 20% 的高斯镜作为输出镜最佳, 泵浦能量为 984 mJ 时, 输出能量为 128 mJ, 脉冲宽度为 7.3 ns, 发散角为 1.22 mrad, 光束质量 M^2 因子约为 4.6, 对应光光转换效率为 13%。后续可以通过增加谐振腔腔长或优化 LDA 和晶体的参数及分布, 提升增益均匀性而进一步优化光束质量。

参考文献:

- [1] Sawruk N W, Burns P M, Edwards R E, et al. ICESat-2 laser Nd: YVO₄ amplifier[C]//SPIE, 2018, 10513: 105130X.
- [2] 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)
- [3] Shi Xiangchun, Chen Weibiao, Hou Xia. Application of all solid state laser in space [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(2): 127-131. (in Chinese)
- [4] Cheng Yong. Development and progress of adjust-free solid state laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(3): 297-301. (in Chinese)
- [5] Stysley P R, Coyle D B, Kay R B, et al. Long term performance of the High Output Maximum Efficiency Resonator (HOMER) laser for NASA's Global Ecosystem Dynamics Investigation (GEDI) lidar [J]. *Optics & Laser Technology*, 2015, 68: 67-72.
- [6] Dai Qin, Zhang Shanchun, Yang Fan, et al. Research on the high beam quality of Gaussian unstable resonators in solid state lasers [J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(3): 559-566. (in Chinese)
- [7] Zou Lu, Jin Qian, Zhou Ping, et al. Unstable resonator design for high power solid-state laser [J]. *Ordnance Industry Automation*, 2014, 33(7): 16-19. (in Chinese)
- [8] Li Kuohu, Ma Jingjie. Mode analysis of the circular plano-concave resonator with a deformed Gaussian-reflectivity mirror [J]. *Optical Technique*, 2010, 36(5): 192-195. (in Chinese)
- [9] Wang Wentao, Liu Yang, Wang Chao, et al. Study on beam-quality of slab laser by the usage of Gaussian mirrors [J]. *Laser & Infrared*, 2012, 42(9): 980-982. (in Chinese)
- [10] Liu Xu, Wang Xiaobing, Cheng Yong, et al. Design of diode pumped all-solid-state laser for SLA [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 37(7): 794-800. (in Chinese)
- [11] Wang Canzhao, Li Li, Shang Wendong, et al. Study on pulsed solid-state lasers with positive branch confocal unstable resonators [J]. *Laser Technology*, 2013, 37(4): 441-444. (in Chinese)
- [12] Meng Peibei, Shi Wenzong, Yan Fanjiang, et al. Influence of resonator misalignment on performance of diode-pumped Nd:YAG laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(6): 0605001. (in Chinese)



第一作者简介: 蒙裴贝 (1987-), 女, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向为空间应用激光器, 参与高分辨率对地观测系统重大专项, 授权国家发明专利 5 项。