

高光束质量弹载激光主动成像激光器研制

毛小洁, 秘国江, 庞庆生, 邹 跃

(华北光电技术研究所 固体激光技术重点实验室, 北京 100015)

摘 要: 弹载激光主动成像制导技术是现代战争中最重要精确制导技术之一。其中, 弹载激光主动成像激光器的研制, 是当前研究的热点和难点。报道了高光束质量弹载 1 064 nm 激光器, 用于激光主动成像。采用二极管端面带内泵浦 Nd:YAG 晶体, 光机电一体化设计, 在重复频率 100 Hz 时, 输出激光脉冲宽度为 3.005 ns, 最大输出单脉冲能量 3.36 mJ, 输出激光光谱宽度 78 pm。带内泵浦和谐振腔的优化设计, 保证了良好的光束质量, 光束质量因子 M^2 在 X 方向为 1.327, Y 方向为 1.354。成像结果表明: 该激光器的成功研制, 对高光束质量一体化固体激光器的参数设计和弹载激光器在激光主动成像中的工程应用都具有一定的指导意义。

关键词: 激光器; 激光主动成像制导; 高光束质量; 弹载

中图分类号: TN248.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)08-2239-04

Fabrication of high beam quality missile-borne active imaging laser

Mao Xiaojie, Bi Guojiang, Pang Qingsheng, Zou Yue

(Science and Technology on Solid-State Laser Laboratory, North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract: The missile-borne laser active imaging guidance technology is one of the most important laser guidance technology in the modern war. Among them, the development of the missile-borne active imaging laser is current research hotspot and difficulty. A high beam quality laser of 1 064 nm used in laser missile-borne active imaging was reported. The pulse width of 3.005 ns, the pulse energy of 3.36 mJ and the spectral width of 78 pm at the repetition rate of 100 Hz were obtained by diode in-band end-pumped Nd:YAG crystal and integrated design. The quality of laser beam M^2 is 1.327 in X direction and 1.354 in Y direction through in-band pumping and cavity optimization design. Imaging results show that, the successful development of the laser have directive meanings for the parameter design of high beam quality solid state laser and engineering application of laser active imaging.

Key words: laser; laser active imaging guidance; high beam quality; missile-borne

0 引言

弹载激光制导武器^[1]具有高精度、高效能、低成本等特点,已在现代局部战争(英阿马岛战争、海湾战争以及科索沃战争)中得到充分体现。随着弹载激光制导武器的发展,弹载激光制导方式也从半主动寻的方式^[2]向“发射后不管”的主动寻的方式^[3]发展。采用激光主动成像^[4],获得目标的三维图像,自动识别目标,直到命中目标。这种弹载激光主动成像的激光器,不仅要体积小、质量轻,还要有高的光束质量,才能获得目标的清晰三维图像,比机载激光器要求更高。Lawrence Y 等人报道的美国低成本自主攻击系统(LOCAAS)^[5]采用二极管泵浦 Nd:YVO₄(掺钕钒酸钇晶体)1 064 nm 弹载激光器,对目标主动成像,在重复频率 3~20 kHz 时,输出脉冲宽度为 6~11 ns、单脉冲能量 600 μJ(3 kHz 时)的 TEM₀₀ 高光束质量激光;在 GEN-III 3D 激光主动成像系统中,麻省理工学院林肯实验室研制的二极管端面泵浦 Nd:YAG 被动调 Q 和腔外倍频微片激光器^[6],在重复频率 3~20 kHz 时,输出脉冲宽度~700 ps,单脉冲能量 33 μJ 的 532 nm 激光。GEN-III 系统对 500 m 处的坦克成像清晰,若要对更远的目标成像,需要更大的单脉冲能量激光器。

采用 880 nm 脉冲二极管端面泵浦技术和紧凑性设计^[7],研制了一台弹载激光主动成像 1 064 nm 激光器,在重复频率 100 Hz 时,单脉冲能量达到 3.36 mJ,脉冲宽度小于 3.1 ns,兼顾了高能量和高峰值功率的特性,峰值功率达到 1 MW,有利于远距离主动成像。同时,光束质量因子 M^2 小于 1.4,有助于提高远距离激光主动成像质量。

1 理论分析和高光束质量设计

1.1 带内泵浦原理

为了得到大能量的激光输出,除了采用热处理良好的散热装置外,利用带内泵浦(in-band pumping)也是一种极为有效的方法。特别是对于 Nd:YAG 晶体,利用带内泵浦的方式对其泵浦可以直接减少在泵浦过程中晶体产生的热量,能有效提高输出激光能量。

图 1 给出了 880 nm 和 808 nm 泵浦 Nd:YAG 晶

体中 Nd³⁺能级图^[8]。采用带内(880 nm)泵浦方式,可以直接将粒子由基态抽运到激光上能级,相对于传统的泵浦波长 808 nm,其量子效率更高。

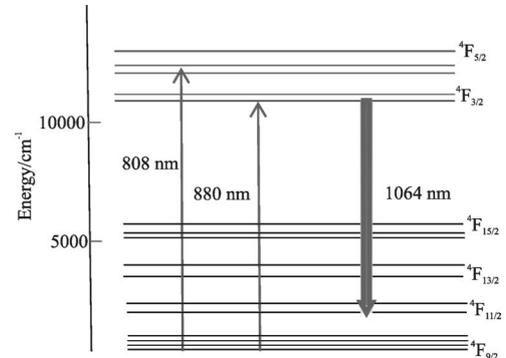


图 1 880 nm 和 808 nm 泵浦 Nd:YAG 晶体中 Nd³⁺能级图

Fig.1 Energy level of Nd³⁺ in Nd:YAG crystal by 880 nm and 808 nm pumping

1.2 高光束质量设计

激光器实验装置如图 2 所示。

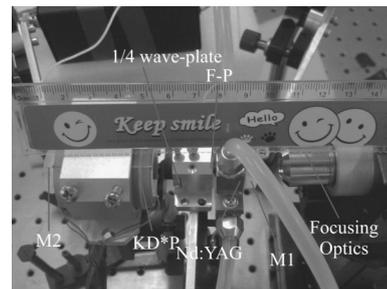


图 2 激光器实验装置图

Fig.2 Experimental setup of laser

泵浦源采用 nLight 上海公司生产的 880 nm 光纤耦合输出模块,光纤芯径 400 μm,数值孔径 0.22,最大输出脉冲功率 200 W,输出脉冲宽度 200~300 μs。该系统中,泵浦源采用低重复脉冲方式工作,脉宽 220 μs 时,单脉冲最大输出能量 44 mJ。泵浦光通过焦距为 50 mm/75 mm 的两个透镜耦合进 Nd:YAG 晶体。Nd:YAG(AR/AR808 nm & 1 064 nm)晶体尺寸为 Φ3 mm×10 mm,掺杂浓度为 0.008。为了补偿 Nd:YAG 的热透镜效应,全反镜 M1(AR@ 808 nm,HR@ 1 064 nm)为平凸透镜,输出耦合镜 M2 在 1 064 nm 的透过率为 70%。偏振片 F-P 尺寸为 20 mm×15 mm×2 mm,电光调 Q 晶体为 KD*P 晶体,长度为 40 mm,系统非常紧凑,谐振腔长度只有 80 mm,有利于窄脉宽的输出。

要使激光输出模式为 TEM00,激光模式在晶体中的光斑半径 ω_{off} 与泵浦光在晶体中的光斑半径 ω_0 应满足^[9]:

$$1 < \frac{\omega_{off}}{\omega_0} < 1.73 \tag{1}$$

当激光模式在晶体中的光斑半径和泵浦光在晶体中的光斑半径接近时,激光器效率最高,所以选用 1:1.5 的耦合透镜。

当 880 nm 单脉冲泵浦能量 22 mJ 时,设计的激光谐振腔稳定性如图 3 所示。

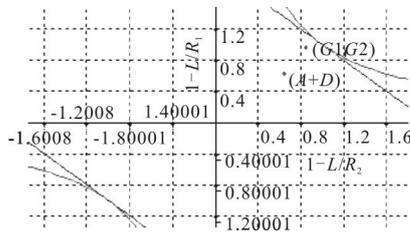


图 3 谐振腔稳定性

Fig.3 Stability of resonator(L is oscillator length, R₁ and R₂ are the radius of M1 and M2)

激光腔的稳定条件 $(A+D)/2=0.66$, 稳定条件 $G1G2=0.83$, 满足激光器谐振腔的稳定性。其中, $G1G2$ 是谐振腔的 G 参数。

谐振腔中各镜面和晶体中的光斑大小如图 4 所示。

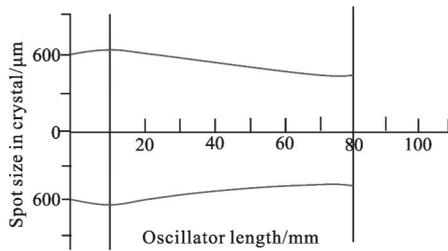


图 4 谐振腔内各点光斑直径
Fig.4 Laser spot size in resonator

为了得到较短的激光脉冲,谐振腔总腔长为 80 mm。在 Nd:YAG 晶体中泵浦模式的光斑半径为 600 μm , 激光光斑半径为 625 μm , 满足激光器输出单模的条件。

2 实验结果及分析

激光器研制过程中,为了得到远程激光成像,应输出更多激光能量。当重复频率为 100 Hz 时,带内

880 nm 泵浦能量为 22.4 mJ 时,输出 1 064 nm 激光 3.36 mJ, 对应的光光转换效率为 15%。为了提高光光转换效率,研制过程中也采用了 Nd:YVO₄ 晶体作为增益介质,虽然光光转换效率能达到 20%,但输出单脉冲能量超过 1.5 mJ 时,Nd:YVO₄ 晶体就会损坏,所以最终采用了光学性能和机械强度都较高的 Nd:YAG 晶体。

采用光束质量分析仪(美国 Spiricon 公司自动 M2 分析仪,型号 M2-200s)测试激光远场光斑如图 5 所示。

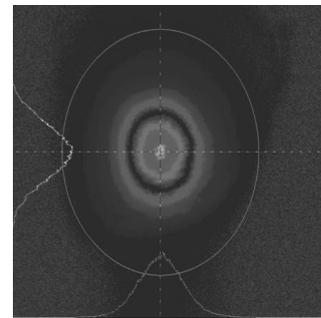


图 5 远场光斑图
Fig.5 Far field beam

图 5 中,4 Sigma 模式测试时,光束质量因子 M^2 在 X 方向为 1.327,Y 方向为 1.354,两个方向都较小,得益于良好的谐振腔设计和 880 nm 泵浦光高的量子效率。在 X 方向的发散角 4.486 mrad,Y 方向的发散角 4.262 mrad。采用美国 LeCroy 公司 16 GHz 示波器(型号 Wave Master 816Zi-A)和 DET210 光电探头测试的脉宽如图 6 所示。

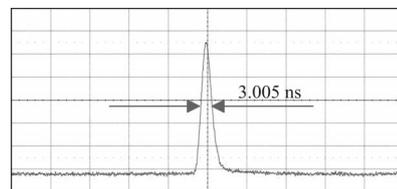


图 6 脉宽测试图
Fig.6 Pulse width

研制过程中采用 BBO 作为调 Q 晶体,输出的脉冲宽度更窄,因为 BBO 调 Q 晶体相对于 KD*P 所需的调 Q 电压更低,但是谐振腔中的高功率密度激光会使 BBO 晶体产生倍频效应,输出微弱的绿光,用

在弹载成像制导中相当于给了敌方信号,容易被敌方发现,所以采用 KD*P 作为调 Q 晶体。

激光主动成像时,窄的线宽有利于减少噪声,提高信号光的强度,从而增强成像质量。采用光谱仪测试输出激光光谱如图 7 所示,中心波长 1 064.361 nm,光谱宽度 0.078 nm,光谱宽度较窄,是因为采用了波长锁定为 880 nm 的泵浦光和窄带膜系输出镜。

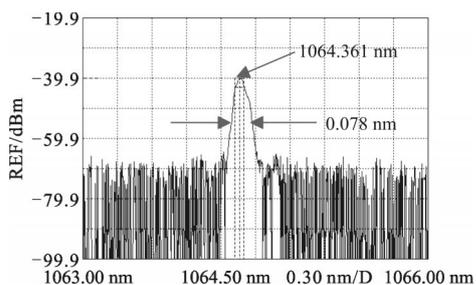


图 7 激光光谱图

Fig.7 Output laser spectrum

激光主动成像激光器研制过程中充分考虑了光机电的一体化和整机的小型化,整台激光器的尺寸只有 260 mm×90 mm×90 mm(长×宽×高),照片如图 8 所示。其中,还包括了输出激光发散角从 1~6 mrad 连续可调的扩束镜,满足了不同距离成像的需要。



图 8 激光器整机照片

Fig.8 Laser photo

3 结论

弹载激光主动成像激光器成像清晰需要激光器具备高的光束质量,并且体积小、质量轻,以及光机电一体化,远距离成像和测距要求激光器输出大的单脉冲能量和窄的脉冲宽度,总之,对激光器整体要求苛

刻。通过对技术指标的综合分析和研究,采用二极管端面带内泵浦 Nd:YAG 晶体,在重复频率 100 Hz 时,输出激光脉冲宽度为 3.005 ns,最大单脉冲能量 3.36 mJ,输出激光光谱宽度 78 pm,光束质量因子 M^2 在 X 方向为 1.327, Y 方向为 1.354。整台激光器的尺寸只有 260 mm×90 mm×90 mm(长×宽×高),包括了输出激光发散角从 1~6 mrad 连续可调的扩束镜。整个系统具有结构小巧、安装简洁,效率高等特点,在弹载和机载激光主动成像方面都具有较强的实用性。

参考文献:

- [1] Wang Kuangbiao. Status quo, key technology and development of laser guided weapon[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(5): 651-655. (in Chinese)
- [2] Fan Shipeng, Lin Defu, Lu Yulong, et al. Design and achievement of hardware-in-the loop simulation system for guided shell based on laser semi-active seeker [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(2): 394-397. (in Chinese)
- [3] Chen Jian, Gao Huibin, Guo Jin, et al. Analysis of "javelin" anti-tank missile guidance mode [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(6): 1777-1781. (in Chinese)
- [4] Li Jianzhong, Peng Qixian, Li Zeren, et al. Technology of missile-borne laser active imaging guidance[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(4): 1117-1123. (in Chinese)
- [5] Lawrence Y Byrd III, Rhoe A Thompson, Michael K Rich. Hardware-in-the-loop testing for the low-cost autonomous attack system(LOCAAS)[C]//SPIE, 1998, 3368: 409-417.
- [6] Richard M Marino, Timothy Stephens, Robert E Hatch, et al. A compact 3D imaging laser radar system using Geiger-mode APD arrays: system and measurements [C]//SPIE, 2003, 5086: 1-15.
- [7] Mao Xiaojie, Bi Guojiang, Pang Qingsheng, et al. 20 MHz compact high power passively mode-locked Nd: YVO₄ laser [J]. *Chinese Journal of Laser*, 2013, 40(10): 1002004. (in Chinese)
- [8] Koechner W. Solid-State Laser Engineering [M]. German: Springer Science and Business, Inc., 2006: 72-72.
- [9] Yan Xingpeng, Liu Qiang, Fu Xing, et al. High repetition rate dual-rod acousto-optics Q-switched composite Nd: YVO₄ laser[J]. *Optics Express*, 2009, 17(24): 21956-21968.