

VRM 腔高光束质量高功率双波长激光器

靳全伟^{1,2,3}, 庞毓^{1,2}, 蒋建锋^{1,2}, 谭亮², 崔玲玲^{1,2}, 魏彬^{1,2}, 万敏^{1,2}, 高清松^{1,2}, 唐淳^{1,2}

- (1. 中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621999;
2. 中国工程物理研究院高能激光科学与技术重点实验室, 四川 绵阳 621999;
3. 中国工程物理研究院 北京研究生部, 北京 100088)

摘要: 研制的双波长短脉冲激光器采用“大模体积腔+渐变反射率输出镜”技术, 对二极管泵浦棒状激光介质产生的热透镜及热退偏进行补偿, 在 500 Hz 下实现了谐振腔短脉冲能量 140 mJ, 脉宽约 17.76 ns 的 1 064 nm 激光输出, 20 min 能量不稳定性 RMS 值小于 0.3%, 激光光束质量 $M^2 \approx 1.6$ 。该实验结果与采用 MOPA 技术路线——谐振腔+预放的方式技术指标相当, 但采用谐振腔的技术路线结构简单紧凑。采用水热法生长抗灰迹效应的 GTR-KTP 晶体作为倍频晶体, 相位匹配方式选择 II 类相位匹配, 倍频后 532 nm 激光单脉冲最高能量 96 mJ, 最高倍频效率 68.6%, 激光光束质量 $M^2 \approx 2.1$ 。通过能量调节设计, 实现了线偏振态 1 064 nm 和 532 nm 激光功率连续可调共光轴输出。

关键词: 高光束质量; 渐变反射率输出镜; 高倍频效率; 双波长; 能量可调

中图分类号: TN248.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.1105003

High beam quality and high power dual-wavelength laser with VRM

Jin Quanwei^{1,2,3}, Pang Yu^{1,2}, Jiang Jianfeng^{1,2}, Tan Liang², Cui Lingling^{1,2}, Wei Bing^{1,2}, Wan Min^{1,2},
Gao Qingsong^{1,2}, Tang Chun^{1,2}

- (1. Institute of Applied Electronics, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China;
2. Key Laboratory of Science and Technology on High Energy Laser, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China;
3. Postgraduate Department, Chinese Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China)

Abstract: The double wavelengths short pulse laser was developed with the high mode volume and variable reflectivity mirror (VRM). The thermal lens and the thermal birefringence produced by diode-lasers pumped rod laser medium was compensated, which presented a short-pulse energy of 140 mJ and 1 064 nm laser output with a pulse width of 17.76 ns at a repetition rate of 500 Hz. The beam quality value was $M^2 \approx 1.6$, and the energy instability (RMS) value of 20 minutes was less than 0.3%. The result of resonator was corresponded with Master Oscillator Power-Amplifier (MOPA) technology, but it was close and neat. The maximum laser energy of 96 mJ at 532 nm was demonstrated by extra-cavity second-harmonic generation (SHG) with type-II angle phase-matched GTR-KTP crystal, the KTP crystals with resistance to grey trace effect was grown by hydrothermal method. The maximum efficiency of SHG was 68.6%, and the beam quality value was $M^2 \approx 2.1$. The 1 064 nm and 532 nm laser were output at same axis with energy regulation.

Key words: high beam quality; variable reflectivity mirror (VRM); high efficiency of SHG; dual-wavelength; energy regulation

收稿日期: 2018-06-05; 修订日期: 2018-07-03

基金项目: 国家自然科学基金(61705208)

作者简介: 靳全伟(1981-), 男, 助理研究员, 博士生, 主要从事二极管泵浦固体激光器方面的研究。Email: angeljqw@163.com

导师简介: 唐淳(1967-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事二极管泵浦固体激光器方面的研究。Email: tangchun21@gmail.com

0 引言

大能量、短脉冲全固态激光器在空间测距、照明、激光加工、光电对抗的领域具有广泛的发展前景及应用领域,近年来国内外都进行了大量的理论及实验研究,实现了平均功率数百瓦级、单脉冲能量数百毫焦的激光输出^[1-4]。受固体激光介质尺寸的限制,固体激光器通常采用腔内多介质串接或振荡-放大 MOPA 方式实现高功率激光输出,采用 MOPA 方式的激光器,可以逐级对光束质量进行有效控制,可实现高光束质量的激光输出;而前者具有效率高、结构简单紧凑等优点,但是谐振腔技术路线对激光光束质量控制手段较少。同时由于采用谐振腔技术路线时,激光在谐振腔内往返振荡,多次经过具有畸变的激光介质,激光经往返多次后光束质量迅速恶化,另外一方面,增大激光介质的口径时,会增加高阶模的数量,谐振腔高阶模也会使光束质量变差,从而难以实现高光束质量的激光输出^[5]。2010 年易亨瑜等在 3 Hz 重复频率下,实现了谐振腔脉冲能量为 320.2 mJ,脉宽 8.3 ns,光束质量为 1.27 的激光输出^[6];2017 年 Li Chaoyang 等在 100 Hz 重复频率下,实现了谐振腔脉冲能量为 185 mJ,脉宽 10.7 ns,光束质量为 2.31 的激光输出^[7];综上所述,采用棒状谐振腔的激光器在较好光束质量条件下,一般输出平均功率不超过 10 W 量级。

2010 年 Sharma S K 等采用热透镜补偿双棒串接实现了 73 ns、160 W 的绿光激光输出^[8]。2015 年延新杰等采用电光调 Q、多级放大、电控偏振态切换技术实现 100 Hz、750 mJ@1 064 nm、106 mJ@532 nm 的波长激光的自由切换输出^[9];2017 年沈兆国等通过调 Q 同步驱动技术和 LD 侧面泵浦板条技术,实现 10 Hz 的条件下,获得 264 mJ 的 1.06 μm 短脉冲激光输出,并采用 KTP 倍频获得最高能量为 185 mJ 的 532 nm 绿光激光输出^[9]。2017 年王磊等采用侧泵浦模块、声光调 Q 技术实现了 70 W@1 064 nm、16 W@1 064 nm 激光输出^[10]。文中通过采用侧泵浦环形 DL 模块优化设计、谐振腔优化设计、热效应补偿等改善光束质量的措施,使用大模体腔+VRM 输出镜实现高重频、大能量、高光束质量的激光输出,在重复频率 500 Hz 下实现了单脉冲能量 140 mJ、激光光束质量

$M^2 \approx 1.6$ 、脉宽约 17.76 ns 的 1 064 nm 激光输出;通过能量调节装置可实现倍频后 532 nm 和 1 064 nm 激光同时输出,倍频后 532 nm 激光最高能量 96 mJ,光束质量 $M^2 \approx 2.1$ 。

1 光束质量控制技术

1.1 热透镜及热退偏补偿

二极管泵浦激光模块为环形侧泵浦激光圆棒型激光介质,圆棒型激光介质外通水冷却,二极管泵浦激光模块在高重频工作下,其平均功率较高,由于激光介质冷却不均匀等原因导致激光介质内部形成温度梯度及应力分布,折射率分布沿径向分布,使激光介质成为具有大像差的双焦透镜,激光介质中径向和切向偏振光具有不同的焦距,简称为热致双折射效应。要提高激光器的光束质量需要对高重频状态下的激光介质产生的热透镜效应及热致双折射效应进行补偿^[11-12]。

由于激光介质的热焦距随着泵浦功率的变化而发生变化,在特定的工作条件下,可以采用几块适合焦距的负透镜对二极管泵浦激光模块激光介质热透镜效应进行补偿,从而改善出光光束质量,提高泵浦模块的能量提取效率,提高输出功率。

棒状激光介质的等效热焦距计算公式为^[11]:

$$f = \frac{\pi K_c \omega_p^2}{P_H} \left(\frac{1}{2} \frac{dn}{dT} + \alpha_1 C_r n_0^3 + \frac{\alpha_2 r_0 (n_0 - 1)}{L} \right)^{-1} \quad (1)$$

式中: K_c 为激光介质的热导率; dn/dT 为随温度变化的折射率变化量; ω_p 为光斑半径; L 为晶体长度; α_1 为吸收系数; P_H 为导致发热的泵浦功率; α_2 为晶体膨胀系数; n_0 为折射率; C_r 为径向光弹系数; C_ϕ 为切向光弹系数。

当激光通过具有热致双折射效应的激光介质时,就会在相同半径 r 的径向偏振光和切向偏振光之间产生相位差,从而影响激光的光束质量。使用两个相同的二极管泵浦激光模块,在同等工作状态下,在二极管泵浦激光模块之间插入 90°石英旋光器,径向偏振光就会变为切向偏振光,反之亦然。激光束通过另一个相同的棒,就会消除两束光之间的相位差,抵消在前一个棒产生的相位迟滞,使一根激光棒中产生的径向与切向偏振光的相位延迟在另一根棒中得到较好的补偿,退偏得到较好的补偿,输出光斑分布也更加均匀,如图 1 所示。

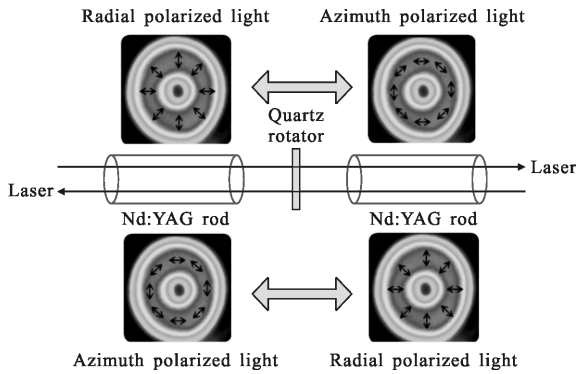


图 1 热致双折射效应补偿示意图

Fig.1 Diagram of thermal induced birefringence effect compensation

1.2 渐变反射率腔设计

渐变反射率型腔镜^[13](Variable Reflectivity Mirror, VRM) 具有平滑的输出光斑形态、较好的模式鉴别能力、大模体积等优点,VRM 镜沿径向减少了谐振腔的边沿衍射效应,消除了输出光束的衍射纹波,抑制了远场旁瓣,可获得高功率高光束质量的激光输出^[6,13-14]。

VRM 的反射率可表示为^[6]:

$$R(r)=R_{\max}\exp[-2(r/\omega_m)^n] \quad (2)$$

式中: R_{\max} 为中心最大反射率; r 为径向距离; ω_m 为反射率降到 $1/e^2$ 时的膜半径; n 为高斯阶数。

当非稳腔腔镜采用变反射率型腔镜时就形成了 VRM 腔,VRM 腔除原非稳腔的偏折损耗和几何损耗外,还具有输出镜的输出损耗,腔镜的反射率为:

$$\bar{R}=\bar{R}/M^2 \quad (3)$$

式中: M 为放大率; \bar{R} 为 VRM 腔平均反射率。

同等条件下 M 硬边非稳腔输出镜放大率的关系为 $M^2=M_0^2\bar{R}$ 。

根据谐振腔曲率半径和非稳腔放大率的关系,谐振腔镜的曲率半径为:

$$R_1=2Ml/(M-1); R_2=-2l/(M-1) \quad (4)$$

式中: l 为谐振腔腔长。

腔内激光的光束半径为:

$$\omega_1=\omega_0(M^n-1)^{\frac{1}{n}} \quad (5)$$

VRM 腔输出激光光强分布为:

$$I_n(r)=[1-R(r)]I_0\exp[-2(r/\omega_1)^n] \quad (6)$$

式中: I_0 为腔内初始光强分布,变换后得到远场光场分布。

2 实验装置布局及实验结果

二极管抽运 Nd:YAG 激光器实验布局如图 2 所示,谐振腔采用平凸腔设计,激光器腔长 630 mm,全反镜为平面高反镜,输出镜为凸面镜 $R=1\,500\text{ mm}$,采用中心透过率 $T=70\%$ 的超高斯输出镜,VRM 膜层 5 mm,外侧镀增透膜,抑制高阶模产生,提高激光的光束质量。二极管泵浦激光模块峰值功率 6.3 kW,采用直径 6 mm、长度 116 mm 的 Nd:YAG 棒双棒串接,Nd 掺杂原子浓度为 0.6%,晶体端面镀增透膜,Q 开关晶体采用 Gooch 电光调 Q KD*P 晶体,晶体通光口径 10 mm,使用焦距为 $-1\,555$ 、 $-1\,777$ 、 $-1\,777$ 、 $-1\,555\text{ mm}$ 平凹负透镜对激光介质的热透镜效应进行补偿,负透镜距离棒端面约 10 mm,负透镜双面镀 1 064 增透膜,在二极管泵浦激光模块间插入石英旋光器进行热退偏补偿,双面镀 1 064 增透膜。

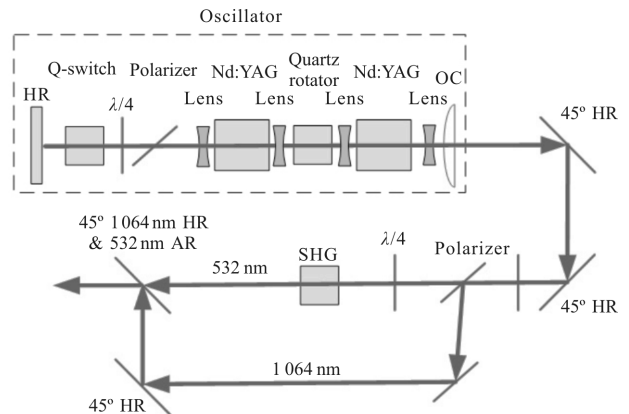
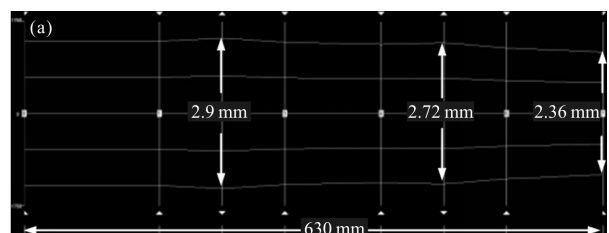


图 2 激光器原理示意图

Fig.2 Sketch map of laser

二极管泵浦激光器工作重复频率 500 Hz,泵浦脉宽 230 μs,峰值功率 3.1 kW,计算 Nd:YAG 棒等效热透镜约为 680 mm,使用 LASCAD 分析获得谐振腔参数如图 3 所示,激光基模在输出镜及棒上的直径分别为 2.36、2.72、2.9 mm。



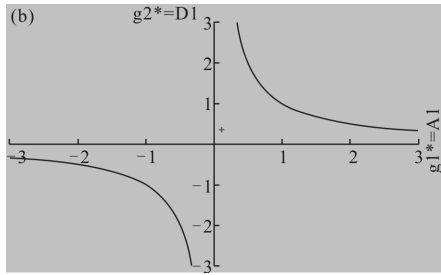


图 3 谐振腔稳定性计算结果

Fig.3 Results of resonator stability calculation

使用 Ophir 功率计测量激光器输出功率 70 W, 单脉冲能量 140 mJ, 20 min 能量不稳定性 RMS 值小于 0.3%, 测量结果如图 4 所示。

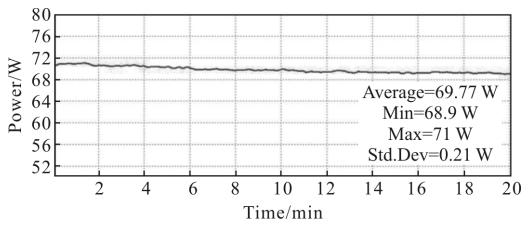


图 4 激光器功率测试结果

Fig.4 Measured result of the laser power

使用 Siricon 公司的 M^2 -200 s 光束质量分析仪测量激光光束质量 $M^2 \approx 1.6$, 光斑成近平顶分布, 激光的光束质量的测试结果如图 5 所示。

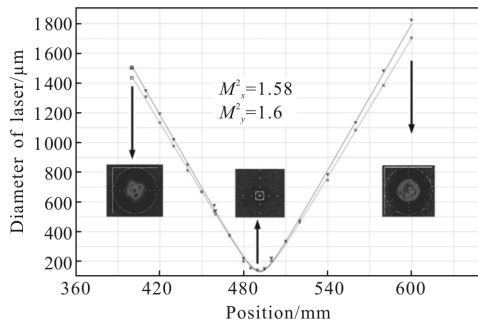


图 5 激光器光束质量

Fig.5 Beam quality of the laser

激光器也可在长脉冲状态下, 更换补偿透镜后实现重复频率 500 Hz, 单脉冲能量 330 mJ, 光束质量约 $M^2 \approx 2.2$ 的 1064 nm 激光输出(实验获得结果), 但由于电光调 Q 晶体热致退偏效应以及腔内峰值功率过高, 会导致晶体及光学元件损伤的原因, 300 mJ 级短脉冲实验并未开展。

使用示波器及高速光电探测器测量激光的脉冲波形及脉宽, 激光脉宽 17.76 ns, 如图 6 所示。光斑直径约 5 mm, 计算激光峰值功率密度为 40.17 MW/cm²。

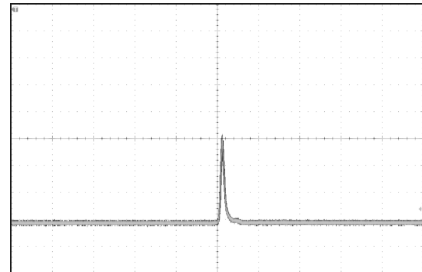


图 6 激光器脉宽

Fig.6 Pulse widths of the laser

激光输出后经 2 个 45° 全反镜后经过 1/2 波片和偏振片组成的调能装置, 使用电机带动半波片旋转, 可改变 1064 nm 激光的偏振方向, 使得激光通过偏振片透射和反射光能量随旋转角变化, 实现 1064 nm/532 nm 激光能量切换的目的。

采用水热法生长抗灰迹效应的 GTR-KTP 晶体(桂林百锐提供)作为倍频晶体。相位匹配方式选择 II 类相位匹配, KTP 晶体尺寸 10 mm×10 mm×10 mm, 切割角度 $\theta=90^\circ$, $\varphi=23.6^\circ$, 匹配温度 $T=80^\circ\text{C}$, 损伤阈值 $\geq 600\text{ mW/cm}^2@1064\text{ nm}$ 、10 ns。采用温控电源控制 KTP 晶体的温度, 降低倍频晶体内部的温度梯度和保证晶体的温度稳定性。温控控制精度为 $\pm 0.02^\circ\text{C}$ 。倍频后 532 nm 激光单脉冲最高能量大于 96 mJ, 最高倍频效率 68.6%, 激光光束质量 $M^2 \approx 2.1$, 见图 7。

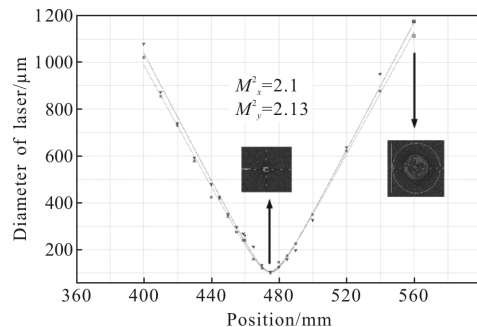


图 7 532 nm 激光光束质量

Fig.7 Beam quality of the 532 nm laser

由于 1064 nm 激光光束质量高, 光斑成近平顶分布, 峰值功率高, GTR-KTP 晶体对 1064 nm 激光吸收小、对光束质量影响小的原因, 使得倍频后 532 nm

激光的光束质量相对常用倍频晶体较高,同时提高了提高激光器的寿命和可靠性。采用高损伤阈值双色镜将 1 064 nm 和 532 nm 激光分离,经偏振片透射未倍频的 1 064 nm 激光进入吸收池;同时使 532 nm 激光和经偏振镜反射 1 064 nm 激光合束后同轴输出,降低 GTR-KTP 晶体走离角造成的影响。

3 结 论

文中采用平凸腔增大激光光束的模体积,VRM 渐变反射率输出镜抑制高阶模振荡,电光调 Q 方式实现 500 Hz 时 17.76 ns、140 mJ 高光束质量激光输出,20 min 能量不稳定性 RMS 值小于 0.3%,激光光束质量 $M^2 \approx 1.6$,由于二极管侧泵浦模块耦合效率较低(约 80%)以及追求高光束质量而牺牲了光光效率,使得光光效率只有接近 10%。采用 II 类相位匹配 GTR-KTP 晶体对激光倍频,倍频后 532 nm 激光单脉冲最高能量大于 96 mJ,最高倍频效率 68.6%,532 nm 激光光束质量 $M^2 \approx 2.1$ 。

采用大模体积腔+VRM 腔镜方式在重复频率 500 Hz、百 mJ 级实现高光束质量的激光输出,与之前采用 MOPA 的技术路线相比,结构简单紧凑,该实验结果为进一步开展高光束质量、高功率 DPL 单谐振腔全固态激光器的研制提供了新的技术参考。

参考文献:

- [1] Mu Shengbo, Song Junru, Li Yang, et al. High accuracy alignment of beam expander of a space-borne laser range finder [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(3): 0306006. (in Chinese)
- [2] Zeng Qinyong, Wan Yong, Qin Kaiyu. Laser resonator of novel configuration applicable to efficient electro-optical countermeasure [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(8): 0806002. (in Chinese)
- [3] Sharma S K, Singh A J, Gupta P K, et al. Thermal birefringence-compensated linear intracavity frequency doubled Nd:YAG rod laser with 73 ns pulse duration and 160 W green output power[J]. *Pramana*, 2014, 82(2): 191–195.
- [4] Hiromitsu Kiriyama, Shinichi Matsuoka, Yoichiro Maruyama, et al. High efficiency second-harmonic generation in four-pass quadrature frequency conversion scheme [J]. *Optics Communications*, 2000, 174(5): 499–502.
- [5] Jin Quanwei, Jiang Jianfeng, Tu Bo, et al. Theory analysis and experimental investigation of thermodynamic unstable resonator solid state laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(3): 0314002. (in Chinese)
- [6] Yi Hengyu, Ye Yidong, Zhou Zhiqiang, et al. High beam-quality Q-switched repetitive mini laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(9): 2318–2322. (in Chinese)
- [7] Li C, Lu C, Li C, et al. 2.36 J, 50 Hz nanosecond pulses from a diode side-pumped Nd:YAG MOPA system [J]. *Optics Communications*, 2017, 394: 1–5.
- [8] Yan X J, Lei L I. 1 064 nm and 532 nm dual-wavelength switchable solid state laser [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2015, 30(6): 37–39. (in Chinese)
- [9] Shen Z G, Tang S H, Dong T, et al. LD pumped Nd:YAG high energy slab laser[J]. *Laser & Infrared*, 2016(2): 187–190. (in Chinese)
- [10] Wang Lei, Nie Jinsong. Study of all solid state laser dual-wavelength composite output technology operating at 1.06 μm and 0.53 μm [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(3): 0305001. (in Chinese)
- [11] Koehner W. Solid-state Laser Engineering [M]. Sun Wen, Jiang Zewen, et al, translated. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese)
- [12] 吕百达. 固体激光器件 [M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2002.
- [13] Yin Ye, Xiao Jun, Yu Haiwu, et al. Developments of resonators with variable reflectivity mirrors [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2007, 5(1). (in Chinese)
- [14] Zhao Bao, Zhou Shouhuan, Zhao Haixia, et al. High beam quality 1.57 μm OPO [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2003, 30(5): 395–397. (in Chinese)