

文章编号: 0258-7025(2010)Supplement 1-0047-05

小型无水冷无风冷 1574 nm 人眼安全激光器

王奕博 金光勇 王超 陈薪羽 于永吉 郭家喜
(长春理工大学理学院激光技术研究所, 吉林 长春 130022)

摘要 报道了一种小型化、高效率无水冷无风冷 1574 nm 人眼安全光学参量振荡(OPO)激光器, 整机尺寸为 $\phi 30 \text{ mm} \times 125 \text{ mm}$ 。研制了椭圆灯抽运椭圆聚光腔, 并设计了旋转对称式无水冷无风冷散热结构, 实现对激光晶体和 OPO 晶体的均匀传导冷却。采用灯抽运 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 被动调 Q Nd:YAG 激光器抽运 KTP-OPO 系统, 每次工作可持续输出 10 次, 间隔 30 s, 在重复频率 10 Hz 时, 可输出 21 mJ 的 1574 nm 人眼安全激光, 脉宽约为 7 ns, 光束发散角小于 6 mrad, 其中 1064~1574 nm 的光-光转换效率约为 30%, 能量稳定性优于 5%。

关键词 激光器; 小型化; 光学参量振荡器; 无水冷无风冷; KTP 晶体

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201037s1.0047

1574 nm Minitype Eye-Safe Laser without Water or Air Cooled

Wang Yibo Jin Guangyong Wang Chao Chen Xinyu Yu Yongji Guo Jiayi
(*Institute of Laser Technology, School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China*)

Abstract A high efficiency 1574 nm eye-safe minitype laser without water or air cooled is reported. It is $\phi 30 \text{ mm} \times 125 \text{ mm}$ in size. An oval lamp-pumped with elliptical cavity was developed, and a rotationally symmetrical heat radiation structure without water or air cooled was designed. The uniformity conduction-cooled of the laser and optic parametric oscillator(OPO) crystal was achieved. By using xenon flash lamp pumped, $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ Q-switched Nd:YAG cavity as the pump source, a KTP crystal optical parametric oscillator (KTP-OPO) system lasing at 1574 nm wavelength was realized. In the experiment, the highest signal output of 21 mJ at 10 Hz within ten pulses was obtained, and the pulse width was about 7 ns, the beam divergent angle less than 6 mrad. The optic-optic conversion efficiency from 1064 to 1574 nm was 30% approximately and the energy stability was better than 5%.

Key words lasers; miniaturization; optical parametric oscillator; without water or air cooled; KTP crystal

1 引 言

随着激光技术的发展, 激光测距技术在军民中的应用日益广泛, 特别在人口密集的地区使用激光测距机, 要求激光源对人眼必须是安全的^[1~4]。1.5~1.8 μm 是对人眼安全的激光波段, 且处于大气窗口, 对烟、雾穿透能力强, 而光学参量振荡器(OPO)^[5~7] 为目前最广泛使用的获取该波段的技术手段。1.57 μm OPO 激光器是将 Nd:YAG 激光器

对人眼不安全的 1.06 μm 激光波长通过光学参量变换转换到 1.57 μm ^[8~11]。OPO 激光器适合作为中远距离小型手持式激光测距机的激光光源。

考虑到人眼安全激光器的实际应用, 本文重点研究小型化方面。为了提高灯抽运激光器的转换效率, 设计了椭圆灯结合椭圆聚光腔抽运结构; 为了实现其小型无冷却运转, 设计了旋转对称式无水冷无风冷散热结构。

收稿日期: 2010-01-12; **收到修改稿日期**: 2010-03-05

基金项目: 吉林省教育厅基金(2007-36)资助课题。

作者简介: 王奕博(1983—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光物理与新型激光器、全固态激光器及非线性频率变换技术等方面的研究。E-mail: wyi1102@qq.com

导师简介: 金光勇(1971—), 男, 博士, 研究员, 主要从事激光物理与新型激光器、全固态激光器及非线性频率变换技术等方面的研究。E-mail: jgycom@163.com

2 实验装置

小型无水冷却无风冷 1574 nm 人眼安全激光器结构示意图如图 1 所示, M_1 为一平面镜, 镀 $1.06 \mu\text{m}$ 全反膜; M_2 为一平面镜, 镀 $1.06 \mu\text{m}$ 部分透射膜; M_3 为一平面镜, 镀 $1.06 \mu\text{m}$ 全反膜和 $1.57 \mu\text{m}$ 部分透射膜; M_4 为滤光镜, 镀 532 nm 和 1064 nm 的高反膜和 1574 nm 的增透膜; KTP 左端面镀 $1.06 \mu\text{m}$ 增透膜和 $1.57 \mu\text{m}$ 全反膜, 右端面镀 $1.06 \mu\text{m}$ 和 $1.57 \mu\text{m}$ 增透膜。 M_1, M_2 构成 $1.06 \mu\text{m}$ 激光谐振腔, Nd:YAG 棒尺寸为 $\phi 4 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$, 两通光面镀 $1.06 \mu\text{m}$ 增透膜, 选用掺铈石英氙灯作为激光器的抽运源, 外形尺寸为 $4 \text{ mm} \times 3.5 \text{ mm} \times 35 \text{ mm}$ (灯弧长) (全长 62 mm), 被动调 Q 晶体选用 $\text{Cr}^{3+}:\text{YAG}$, 小信号透射率 $T_0 = 31.2\%$ 。KTP 左端面和 M_3 构成 OPO 谐振腔, 非线性晶体 KTP 尺寸为 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$, 根据相位匹配条件, 当 OPO 输出 $1.57 \mu\text{m}$ 时, 恰好可实现 II 类非临界相位匹配, 晶体采用 X-Z 切割, $\theta = 90^\circ, \varphi = 0^\circ$, 此时无走离效应, 接收角为 3.2° , 有效非线性系数 d_{eff} 最大, 约为 3.3 pm/V 。

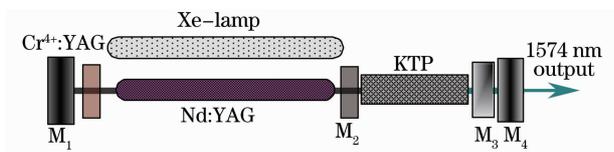


图 1 小型 1574nm 人眼安全激光器结构示意图

Fig.1 Schematic of 1574nm eye-safe minitype laser

3 激光器设计

3.1 聚光腔设计

聚光腔是将抽运光源辐射的光能最大限度地聚集到工作物质上的器件, 其设计好坏直接影响激光器的转换效率和激光性能, 聚光腔结构通常有椭圆柱聚光腔、圆柱聚光腔、椭球聚光腔、球面聚光腔、旋转椭球面聚光腔和紧包式聚光腔。这些聚光腔各有不同的特点。其中椭圆柱聚光腔, 如图 2 所示, 具有较高的传输效率。

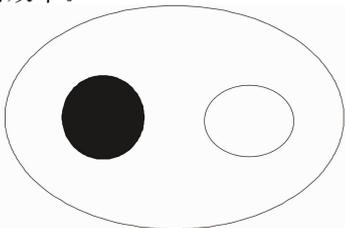


图 2 椭圆柱聚光腔

Fig.2 Elliptical cylinder cavity

根据像差补偿原理, 设计了椭圆灯结合椭圆聚光腔抽运结构, 在该种抽运结构中椭圆抽运灯发出的抽运光经椭圆聚光腔反射后成圆柱形像, 与圆柱形激光晶体棒完全重合, 改善了激光晶体内抽运光场分布和热分布, 提高了抽运效率, 进而提高了激光输出光束质量。

3.2 本振抽运源无水冷却无风冷设计

激光器的冷却关系到激光器的稳定及激光器的输出性能和可靠性。对于 $\text{Cr}^{3+}:\text{YAG}$ 被动调 Q 激光器的无水冷却设计是通过工程方法计算 Nd:YAG 的耗散热量, 确定传导介质与 Nd:YAG 接触的最小长度, 从而说明传导冷却的可行性。

激光器按 0.5% 的电光转换效率计算, 输出单脉冲 66 mJ 能量, 需要注入电能 13.2 J , 如果注入电能的 5% 转化为热量, 则散热的热量为 660 mJ 。激光器要求每次工作输出 10 次, 每次工作间隔 30 s , 每次工作没有热积累, 则必须在 30 s 内将产生的全部热量通过传导冷却传导出去, 此时的传导热传导功率最小值为

$$P_a = 660 \times 10 / 30 \text{ mW} = 220 \text{ mW}. \quad (1)$$

在闪光灯抽运期间, 激光晶体吸收了能量, 如果激光棒均匀地吸收了抽运辐射, 则在抽运脉冲结束时, 其温度也均匀地上升。每次工作激光输出 10 次之间的间隔为毫秒量级, 忽略脉冲间的传热, 则激光晶体棒的温升为

$$\Delta T = P_a / c\rho V, \quad (2)$$

式中 c 为激光晶体棒 Nd:YAG 的比热, ρ 为体密度, V 为激光晶体棒的体积, 取 $V = \phi 4 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$, 密度 $\rho = 4.56 \text{ g/cm}^3$, $P_a = 220 \text{ mW}$ 。

采用如图 3 所示的传导冷却方式, 图中 1 为激光晶体; 2, 3 为金属环, 与激光晶体接触传导冷却的方式进行制冷,

$$P_a = 2\pi r l [T(r_0) - T_F], \quad (3)$$

式中 $T(r_0)$ 为晶体表面温度, T_F 为铜环的温度。



图 3 Nd:YAG 激光晶体传导冷却示意图

Fig.3 Schematic of Nd:YAG laser crystal conduction-cooled structure

假设在激光发射期间激光晶体棒周围没有升温, 则激光晶体表面与金属环之间的温差等于激光晶体的温升, 即

$$T(r_0) - T_F = \Delta T, \quad (4)$$

如果能够将热量完全通过传导冷却导出,则与激光晶体接触的最小长度为

$$l > \frac{P_a}{2\pi r \Delta T} \approx 4.5 \text{ mm.} \quad (5)$$

以上使用的是 Nd:YAG 热传导系数,而实际上应为它与金属环之间的热传导系数,由于金属的传热系数远大于 Nd:YAG 热传导系数,所以实际热传导系数也应大于 Nd:YAG 的热传导系数,因此环的高度大于 4.5 mm 是完全能将热量传出去的。这里铜环与 Nd:YAG 的接触长度为 6 mm。

3.3 OPO 晶体无水冷无风冷设计

同理,通过工程方法计算 OPO 晶体的耗散热量,进而估算出与 OPO 晶体接触的最小表面积。与激光晶体不同的是,OPO 晶体的产热是以晶体吸收 1.06 μm 抽运光和 OPO 变换过程所产生的 1.57 μm 和 3.3 μm 波长的光而积累的热。抽运光方面,激光器输出单脉冲能量为 66 mJ,工作频率为 10 Hz,则在 1 s 内产生的功率为 0.66 W;信号光和空闲光方面,假设抽运光到信号光和空闲光的转换效率为 50%,则在 1 s 内产生的功率为 0.33 W。在理想状态下,1 s 内产生的全部热量都通过传导冷却传出去,此时传导热功率最小值为 0.99 W。

$$\Delta T_K = P_a / c_K \rho_K V_K, \quad (6)$$

式中 c_K 为 KTP 的比热, ρ_K 为体密度, V_K 为 KTP 的体积,取 $V_K = 5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$,密度 $\rho_K = 3.01 \text{ g/cm}^3$, $P_a = 0.99 \text{ W}$ 。

$$P_a = \pi s [T(r_0) - T_F], \quad (7)$$

假设在激光发射期间 KTP 周围没有升温,则 KTP 晶体与金属之间的温差等于 KTP 晶体的温升,即

$$T(r_0) - T_F = \Delta T. \quad (8)$$

如果能够将热量完全通过传导冷却导出,则与 KTP 接触的最小面积为

$$s \geq P_a / (\pi \Delta T) \approx 125 \text{ mm}^2, \quad (9)$$

所以表面积大于 125 mm² 是完全能将热量传出去的。由于设计时采用 KTP 晶体与铜质材料的接触面积可达 400 mm²,因此可以直接将热量传出去,如图 4 所示。

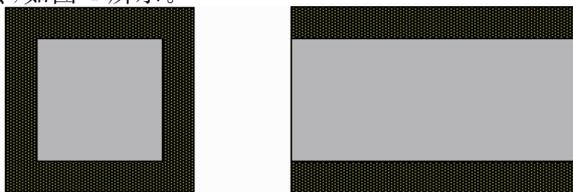


图 4 KTP 晶体传导冷却设计示意图

Fig. 4 Schematic of KTP crystal conduction-cooled

4 实验结果

首先测试了本振 1.06 μm 激光的能量(如图 5 所示),选用的能量计为以色列 OPHIR 公司的 NOVA II,探头 PE25。当 M₂ 输出镜透射率 T=50%时,在电注入能量超过 12.5 J 情况下,测量到的能量几乎加倍,此时激光已形成了双脉冲,这对激光测距是不利的;而当输出镜透射率 T=80%时,在电注入能量区间一直能保持单脉冲运转,因此最终选用了输出镜 M₂ 透射率 T=80%,选用示波器为 TEK-TDS2012 型示波器,D400FC 型光电探头,光谱响应范围 800~1700 nm,1064 nm 输出脉冲波形图如图 6 所示。不同输出镜 M₃ 透射率下 1.57 μm 输出能量随电注入能量的变化情况如图 7 所示,当 M₃ 透射率 T=73%时输出能量较高,因此最终选用了 T=73%的输出镜,脉冲波形图如图 8 所示。在此条件下,激光器连续输出 10 次的能量如图 9 所示,可看出其能量稳定性优于 5%。

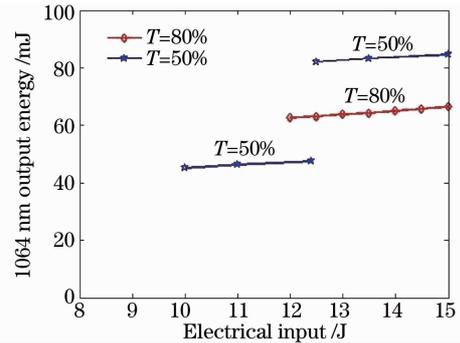


图 5 不同输出镜透射率下 1064 nm 输出能量随电注入能量的变化

Fig. 5 Dependence of 1064 nm output energy on electrical input at different output mirror transmittances

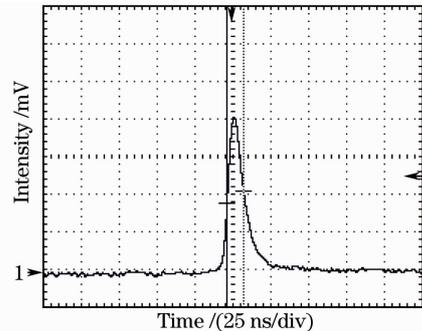


图 6 1064 nm 输出脉冲波形图

Fig. 6 Pulse shape of 1064 nm output

采用美国 Ocean Optics NIRQuest512 型光谱仪测量了 1.57 μm 激光输出谱线,如图 10 所示,测得最终波长为 1574 nm,可以看出设计的滤光镜 M₄ 起到了很好的效果。

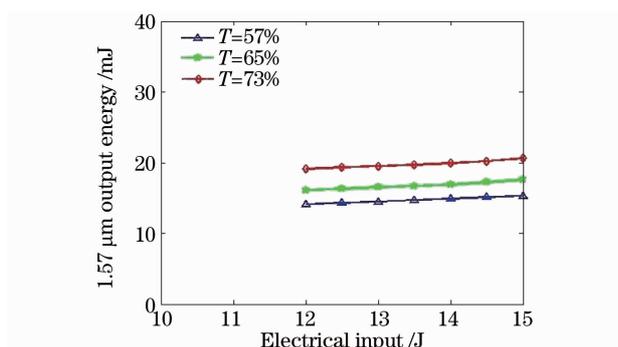


图 7 不同输出镜透射率下 1.57 μm 输出能量随电注入能量的变化

Fig. 7 Dependence of 1.57 μm output energy on electrical input at different output mirror transmittances

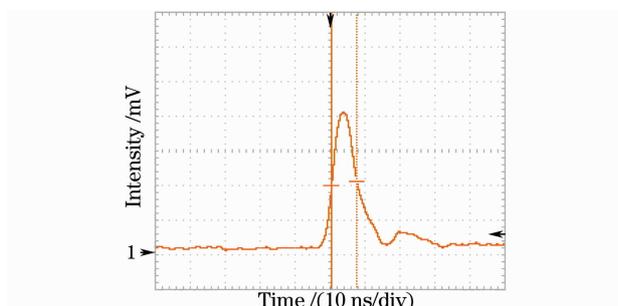


图 8 1.57 μm 输出脉冲波形图

Fig. 8 Pulse shape of 1.57 μm output

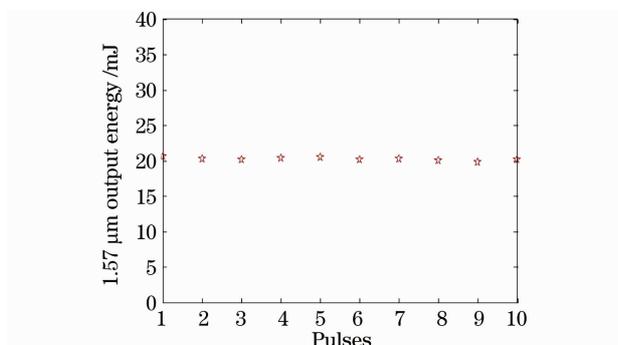


图 9 1.57 μm 激光器输出 10 次的能量稳定性

Fig. 9 Energy stability of 1.57 μm laser output in 10 times

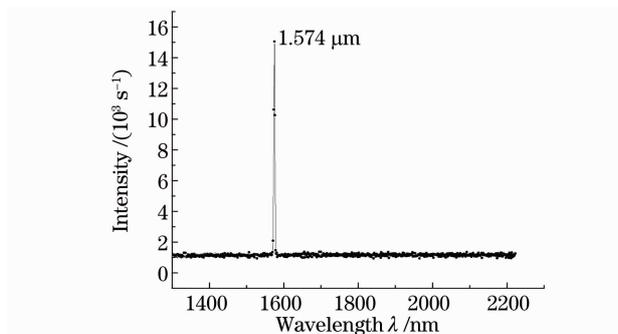


图 10 1.57 μm 人眼安全激光波长测量

Fig. 10 1.57 μm eye-safe laser wavelength measurement

所研制的人眼安全激光照实物整机如图 11 所示。整机尺寸为 $\phi 30 \text{ mm} \times 125 \text{ mm}$ 。

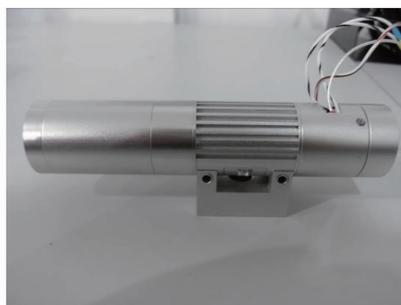


图 11 小型人眼安全激光器实物整机

Fig. 11 Photo of minitype eye-safe lasers

5 结 论

通过对激光器聚光腔和冷却系统的设计和计算,研制了一种小型无水冷无风冷人眼安全 OPO 激光器,利用 1.06 μm 的灯抽运 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 被动调 Q $\text{Nd}:\text{YAG}$ 抽运 KTP-OPO 系统,获得了较理想的 1.57 μm 信号光输出,并测量了信号光的波长、单脉冲能量、脉宽、发散角等参数。整套系统无论尺寸和成本都远低于 LD 抽运激光器(DPL),可作为小型手持式激光测距机用人眼安全激光光源。今后,可从 OPO 谐振腔型方面入手,进一步提高 OPO 信号光的光束质量,使人眼安全激光器有更广泛的应用。

参 考 文 献

- Mingwei Gao, Chunging Gao, Kun Tang *et al.*. Intracavity optical parametric oscillator at 1.57- μm wavelength pumped by passive Q-switched Nd:GdVO₄ laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(2): 127~129
- Yuye Wang, Degang Xu, Yizhong Yu *et al.*. High-peak-power, high-repetition-rate intracavity optical parametric oscillator at 1.57 μm [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(2): 93~95
- Xu Liu, Changyong Lu, Xiaobing Wang *et al.*. Efficient intracavity optical parametric oscillator with diode side-pumped electro-optic Q-switched laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(11): 664~666
- Yan Zhong, Xiuwei Fan, Haitao Huang *et al.*. An efficient intracavity-pumped KTP optical parametric oscillator at 1572 nm [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(11): 646~648
- Bao Zhaorigetu, Zhou Shouhuan, Zhao Haixia *et al.*. High beam quality 1.57 μm OPO [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(5): 395~397
- 包照日格图,周寿桓,赵海霞等. 高光束质量 1.57 μm 的光参量振荡器[J]. *中国激光*, 2003, **30**(5): 395~397
- Liu Qiang, Gong Mali, Yan Ping *et al.*. Passively Q-switched laser with intracavity optical parametric oscillator for eye-safe output[J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(2): 113~116
- 柳强,巩马理,闫平等. 被动调 Q 人眼安全内腔光学参量振荡器[J]. *中国激光*, 2003, **30**(2): 113~116
- Bao Zhaorigetu, Wang Bo, He Lijie *et al.*. Compact eye safe OPO laser[J]. *Laser & Infrared*, 2006, **36**(8): 639~640
- 包照日格图,王博,何利杰等. 紧凑型人眼安全 OPO 激光器

- [J]. 激光与红外, 2006, **36**(8): 639~640
- 8 Larry R. Marshall, Jeff Kasinski, A. D. Hays *et al.*. Efficient optical parametric oscillator at 1.6 μm [J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(9): 681~683
- 9 T. Debuisschert, J. Raffy, J. P. Pocholle *et al.*. Intracavity optical parametric oscillator; study of the dynamics in pulsed regime[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1996, **13**(7): 1569~1587
- 10 Razvan Dabu, Constantin Fenic, Aurel Stratan. Intracavity pumped nanosecond optical parametric oscillator emitting in the eye-safe range[J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(24): 4334~4340
- 11 Guohua Xiao, Michael Bass, Madhu Acharekar. Passively Q-switched solid-state lasers with intracavity optical parametric oscillators[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1998, **34**(11): 2241~2245