

## LD 端面抽运 Nd:YAP 腔内 RTP-OPO 1.65 $\mu\text{m}$ 激光研究

邵振华, 朱海永, 叶彦林, 段延敏, 尉鹏飞, 张 栋

(温州大学 物理与电子信息工程学院, 浙江 温州 325035)

**摘要:** 报道了基于非临界相位匹配磷酸钛氧铷晶体(RTP)的光参量振荡激光性能研究。采用激光二极管端面抽运 Nd:YAP 激光晶体, 组成内腔式 RTP-OPO 系统, 对比了在不同声光调 Q 重复频率下的信号光输出特性。在 20 kHz 重复频率和 13.1 W 的抽运入射功率下, 获得平均功率 1.1 W 的 1.65  $\mu\text{m}$  人眼安全激光的输出, 光-光转化效率为 8.4%; 在重复频率为 5 kHz 时, 获得了最窄脉 4.4 ns, 最高单脉冲峰值功率 30.8 kW。结果表明, 基于 RTP 晶体的 OPO 变频是获得 1.6  $\mu\text{m}$  波段激光的一种有效新途径。

**关键词:** 1.6  $\mu\text{m}$  波段激光; RTP 晶体; 非临界相位匹配; 光参量振荡

**中图分类号:** TN248.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)05-1397-05

### 1.65 $\mu\text{m}$ RTP-OPO intra-cavity driven by LD end-pumped Nd:YAP laser

Shao Zhenhua, Zhu Haiyong, Ye Yanlin, Duan Yanmin, Wei Pengfei, Zhang Dong

(College of Physics and Electronic Information Engineering, Wenzhou University,  
Wenzhou 325035, China)

**Abstract:** The performance of the optical parametric oscillator was reported, which was based on the non-critical phase matching of the arsenic acid potassium titanium oxide (RTP) crystal. The intra-cavity RTP-OPO system was driven by the LD end pumped Nd:YAP laser. The output characteristics of the signal light were compared at the different pulse repetition rates of the acousto-optic Q-switcher. The 1.65  $\mu\text{m}$  eye-safety laser was obtained when the incident diode pump power of 13.1 W and the pulse repetition frequency of 20 kHz, the maximum average output power was up to 1.1 W and which was achieved with the conversion efficiency of 8.4%. The shortest pulse width of 4.4 ns and the highest peak power of 30.8 kW were obtained when the pulse repetition rate was 5 kHz. The results show that the RTP crystal with the OPO frequency conversion system is a new way to get 1.6  $\mu\text{m}$  wavelength laser.

**Key words:** 1.6  $\mu\text{m}$  band laser; RTP crystal; critical phase matching; optical parametric oscillator

收稿日期: 2014-09-14; 修订日期: 2014-10-17

基金项目: 国家自然科学基金(10904143); 浙江省公益技术应用研究计划(2015C34017);

浙江省自然科学基金(LQ13F050004, LY14F050008); 温州市公益性科技计划项目(G20140057)

作者简介: 邵振华(1989-), 男, 硕士生, 主要从事固体激光器的研究。Email: szhua01@yeah.net

导师简介: 朱海永(1982-), 男, 副教授, 主要从事激光和非线性光学方面的研究。Email: hyzhu.opt@gmail.com

## 0 引言

1.6  $\mu\text{m}$  激光属于人眼安全波段激光,在大气传播中有较强的穿透力,在激光测距、测高、大气遥感、激光雷达和激光医疗等方面,有着广泛的应用和研究价值,受到越来越多的关注<sup>[1-2]</sup>。目前文献报道的 1.6  $\mu\text{m}$  波段的激光主要通过抽运掺 Er 激光介质直接输出来实现的。2010 年,澳大利亚 Adelaide 大学首次用 1 470 nm 半导体激光器谐振抽运 Er:YAG 晶体,在腔内放置 F-P 标准具,在抽运入射功率为 550 mW 时,输出了 30 mW 的 1 645 nm 波长的激光<sup>[3]</sup>。Zhang 等通过高功率 1 532nm 的 Er<sup>3+</sup>、Yb<sup>3+</sup>共掺激光抽运 Er:YAG 晶体,在抽运功率为 28.8 W 时,获得了 14 W 的 1 617 nm 波长激光的输出<sup>[4]</sup>。虽然利用掺 Er<sup>3+</sup>激光材料可以获得较高功率的激光输出,但由于 1.6  $\mu\text{m}$  波段对应 Er<sup>3+</sup>的准三能级结构跃迁,低能级寿命非常长,不易实现调 Q 窄脉宽激光的输出,而且 1.5  $\mu\text{m}$  波段的抽运源相对近红外半导体抽运源来说成本较高。笔者通过对磷酸钛氧铷晶体(RbTiOPO<sub>4</sub>, RTP)的相位匹配参数计算,结果表明,在最常见的 1.0  $\mu\text{m}$  波段激光抽运下,其非临界相位匹配的光参量振荡(OPO)的信号光刚好在 1.6  $\mu\text{m}$  波段,而且,OPO 系统已得到广泛的研究,其应用技术越来越成熟。RTP 晶体与其同构体磷酸钛氧钾(KTA)和磷酸钛氧钾(KTP)晶体一样,具有较大的非线性光学系数和较高的损伤阈值。目前对于基于 KTA 和 KTP 的 OPO 激光研究较多,但对于 RTP 晶体的研究,较多的集中在用作电光 Q 开关的报道<sup>[5-8]</sup>,而对其用作非线性光学变频晶体的研究相对较少。李永亮等人利用 RTP 晶体进行腔内倍频,在抽运功率为 20 W 时,获得了 2.13 W 的 543 nm 绿光的输出<sup>[9]</sup>;Yu 等人通过腔内双晶体 RTP 和频,获得了 500.8 nm 激光的输出<sup>[10]</sup>;Albrecht 等人通过纳秒级脉冲 Nd:YAG 1.06  $\mu\text{m}$  激光外腔抽运 RTP-OPO 系统,获得 1.62 $\mu\text{m}$  激光的输出,对应 1.06~1.62  $\mu\text{m}$  激光的转换效率为 31.3%<sup>[11]</sup>。

此文利用 LD 端面抽运 Nd:YAP 晶体的 1 080 nm 波长激光,进行内腔式非临界相位匹配 RTP-OPO 实现 1.65  $\mu\text{m}$  波段激光输出的实验研究。在 20 kHz 声光调 Q 重复频率和 13.1 W 的抽运入射功率下,获

得最大功率为 1.10 W 的 1.65  $\mu\text{m}$  激光的输出,对应 808 nm 半导体激光到 1.65  $\mu\text{m}$  波段激光的转换效率为 8.4%。

## 1 理论分析

RTP 与 KTP 一样都属于正交晶系的各向异性晶体,其在晶体各个方向的折射率可由双轴晶体的折射率椭球给出:

$$\frac{\sin^2\theta\cos^2\phi}{n_x^{-2}-n_x^{-2}} + \frac{\sin^2\theta\sin^2\phi}{n_y^{-2}-n_y^{-2}} + \frac{\cos^2\theta}{n_z^{-2}-n_z^{-2}} = 0 \quad (1)$$

式中: $n_x, n_y, n_z$  为晶体的 3 个主折射率; $\theta$  为波法线方向与轴的夹角; $\phi$  为在平面内的投影与轴的夹角。RTP 与其同构体 KTP 和 KTA 晶体类似,在非线性频率变换中, I 类相位匹配的有效非线性系数很低,在  $xz$  主平面( $\phi=0^\circ$ )内的 II 类相位匹配的有效非线性光学系数较大。为了实现相位匹配,抽运光波(波长  $\lambda_p$ )、信号光波(波长  $\lambda_s$ )、闲频光波(波长  $\lambda_i$ )在非线性光学晶体内的相互作用需要满足能量守恒和动量守恒条件:

$$\begin{cases} \frac{1}{\lambda_p} = \frac{1}{\lambda_s} + \frac{1}{\lambda_i} \\ \frac{n_x(\lambda_p)}{\lambda_p} = \frac{n_y(\lambda_s)}{\lambda_s} + \frac{n(\theta, \lambda_i)}{\lambda_i} \end{cases} \quad (2)$$

结合 RTP 晶体的 Sellmeier 方程可计算出其随着  $\theta$  角度的波长调谐曲线。图 1 给出了在室温下,在抽运光波长为 1.08  $\mu\text{m}$  时,RTP 晶体在  $xz$  主平面内随着角度  $\theta$  变化对应的信号光、闲频光的相位匹配曲线以及对应的走离角和有效非线性系数关系。从图 1 中可以看出,对应  $\theta=90^\circ, \theta=0^\circ$  的匹配角度时,信号光和闲频光的波长分别在 1.65  $\mu\text{m}$  和 3.1  $\mu\text{m}$  左

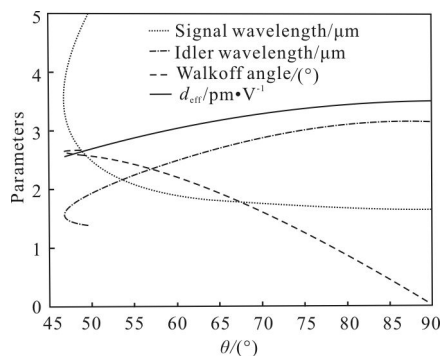


图 1 1.08  $\mu\text{m}$  抽运下,RTP-OPO 在  $xz$  主平面的相位匹配参数  
Fig.1 Calculated phase matching parameters of RTP-OPO pumped at 1.08  $\mu\text{m}$  in  $xz$  principal plane

右,对应的光波走离角最小,晶体的有效非线性系数数值最大,说明在此条件下可以获得较高的参量转换效率。对比其同构体的非临界相位匹配信号光波长,RTP-OPO的信号光波长可拓展到1.6 μm波段,是相对KTP、KTA和RTA等晶体最长的。

## 2 实验装置与结果

LD端面抽运Nd:YAP声光调Q内腔式RTP-OPO装置示意图见图2。Nd:YAP晶体作为激光介质,是一种非常优秀的激光晶体材料,属于各向异性的正交结构晶系,有着良好的光学、热学和机械性能,具有克服热致退偏振和输出偏振激光的特点<sup>[12-14]</sup>,在输出高能激光和激光非线性频率变换等方面,和其他激光材料相比具有较大的优势。在文中实验中,选择透光方向沿*b*轴切割的Nd:YAP晶体,Nd<sup>3+</sup>掺杂浓度为0.9 at.%,尺寸为Φ3.6 mm×7 mm,两端面镀对808 nm和1 080 nm双波长增透的膜系。为了保证晶体良好的热导效应,将Nd:YAP晶体的侧面用铝箔包裹并置于紫铜块内,用半导体制冷器进行温度控制,使其温度保持在300 K左右。

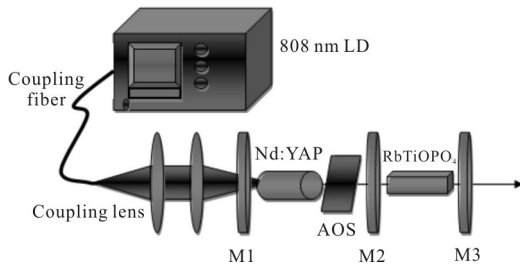


图2 LD端面抽运声光调Q Nd:YAP内腔式RTP-OPO实验装置

Fig.2 Experimental configuration for the RTP-OPO pumped by an acousto-optic Q-switched Nd:YAP laser

抽运源采用光纤耦合输出的半导体激光器,中心波长为808 nm,光纤芯径为200 μm,数值孔径为0.22。经过光学耦合系统准直聚焦,得到光腰半径为320 μm的光斑,并入射到Nd:YAP晶体。为了实现调Q脉冲输出,在镜片M2与激光介质Nd:YAP晶体之间放置一个声光调Q开关,长度为30 mm,驱动中心频率为30 MHz,射频功率为20 W。

使用的RTP非线性光学晶体按Ⅱ类非临界相位匹配( $\theta=90^\circ, \phi=0^\circ$ )切割,尺寸为4 mm×4 mm×20 mm。

两通光面分别镀对应的1.08 μm基频光和1.65 μm信号光的增透膜系( $R<0.2\%$ )。其侧面用铝箔包裹并置于紫铜块内,通过半导体制冷控制系统将温度控制在300 K左右。在图2中,输入镜片M1镀有对808 nm波长的增透膜和1.08 μm波长的高反膜;中间镜片M2镀有对1.65 μm激光高反膜(HR,  $R>99.9\%$ )和1.08 μm激光增透膜(HT,  $T>98\%$ );输出镜片M3镀有对1.08 μm激光高反膜(HR,  $R>99.9\%$ )和1.65 μm激光部分透过膜( $T=22\%$ )。其中M1与M3构成腔长100 mm的1.08 μm激光的谐振腔;M2和M3组成腔长为40 mm的OPO振荡腔。

在实验中,采用镀膜参数同M2的镜片当作分光镜,把1.65 μm信号光和漏出的少量1.08 μm基频光分开。通过调节声光调Q重复频率和抽运入射光束在Nd:YAP晶体介质中的不同位置,获得了1.65 μm信号光的不同输出功率。通过对漏过的基频光输出功率的测量表明,在OPO阈值以上,1.08 μm基频光的输出功率维持在8~10 mW之间。在声光调Q脉冲重复率为10、20、30 kHz时,信号光平均输出功率与抽运光入射功率的关系如图3所示,由高分辨率光纤光谱仪(AvaSpec-3648)测量得到的信号光光谱如图4所示。

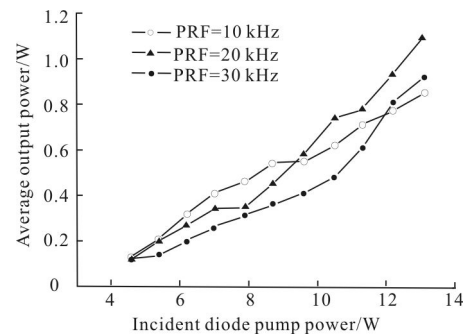


图3 不同重复率下的信号光输出功率与抽运功率关系  
Fig.3 Average output power of signal vs incident pump power with different PRFs

从图3可看出OPO谐振的阈值在4.3~4.5 W之间,激光平均输出功率随着调Q脉冲重复频率的下降而下降;随着抽运入射功率的增加,不同重复率下的信号光输出功率也在增加。当声光调Q的重复频率为20 kHz,抽运入射功率为13.1W时,得到最大输出功率为1.10 W的1.65 μm激光,最大光-光

转换效率为 8.4%,如图 5 所示。

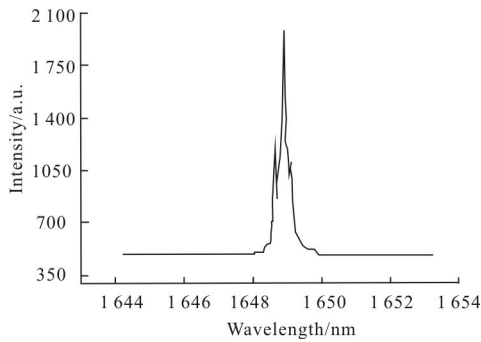


图 4 光纤光谱仪测量得到的 RTP 晶体输出的激光光谱  
Fig.4 Measured spectrum irradiated from RTP crystal

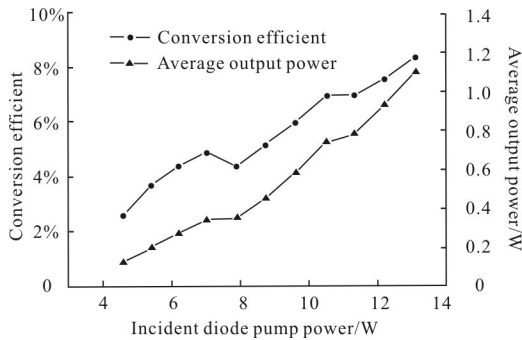


图 5 重复频率为 20 kHz 时,转化效率、输出平均功率与抽运功率的关系

Fig.5 Conversion efficiency and average output power vs incident diode pump power at Q-switching repetition rate of 20 kHz

通过 PIN 光电二极管来探测激光信号,并通过 500 MHz 泰克数字示波器(型号 TDS3052B)来呈现信号光和基频光的脉冲波形。如图 6 所示,在最高输出功率对应的 20kHz 重复率和 13.1 W 抽运入射功率下,信号光的脉冲宽度约为 4.6 ns,对应的基频光的脉冲宽度约为 9.7 ns。信号光的脉冲峰值相对于基频光延迟,主要是因为 OPO 振荡的建立,消耗了大量的基频光,使得腔内基频功率密度明显下降。

在抽运入射功率为 13.1 W 时,输出的 1.65 μm 激光峰值功率、脉冲宽度与不同脉冲重复率的变化关系如图 7 所示。结果表明,当其他条件保持不变时,随着声光调 Q 重复率的降低,脉冲宽度逐渐降低,峰值功率逐渐升高。当重复率从 60 kHz 降低到 5 kHz 时,对应的脉冲宽度由 5.1 ns 缩短到 4.4 ns。通过计算可知,信号光的单脉冲能量增加,对应的峰值输出功率从 1.9 kW 升高到 30.8 kW。当声光调 Q 的脉冲重复率为 5 kHz 时,获得了最高峰值功率 30.8 kW、最窄脉冲宽度 4.4 ns 的 1.65 μm 信号光输出。

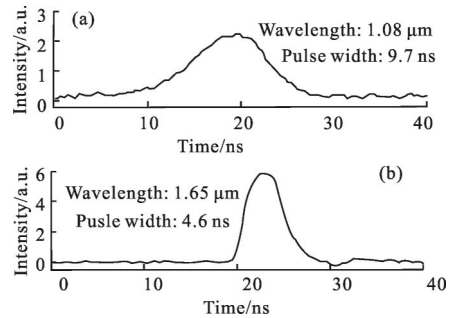


图 6 重复率为 20 kHz 和抽运功率为 13.1 W 时,信号光和基频光的脉冲波形

Fig.6 Temporal pulse profile and signal wave at the Q-switching PRF of 20 kHz and an incident pump power of 13.1 W

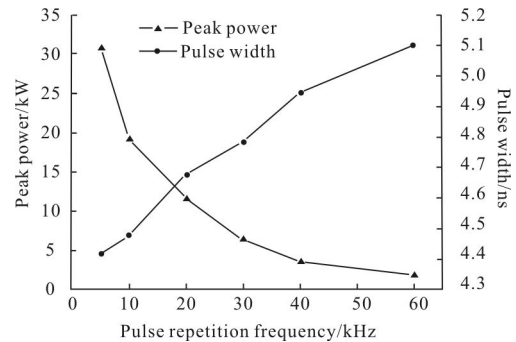


图 7 抽运功率为 13.1 W 时,峰值功率、脉冲宽度与不同重复率的关系

Fig.7 Peak power and pulse width vs the repetition rate at the incident power of 13.1 W

### 3 结论

文中研究了 LD 端面抽运 Nd:YAP 声光调 Q 内腔式 RTP-OPO 实验,并获得波长为 1.65 μm 的激光。在实验中,LD 端面抽运 Nd:YAP,在连续工作状态下的 RTP-OPO 系统,通过改变抽运入射功率和声光调 Q 重复率,获得了在不同重复频率下的信号光的平均输出功率以及相关的脉冲峰值和宽度。在 20 kHz 重复频率和 13.1 W 的抽运入射功率下,获得了平均功率 1.1 W 的 1.65 μm 人眼安全激光的输出,光-光转化效率为 8.4%;在重复频率为 5 kHz 时,获得了最窄脉宽 4.4 ns,最高单脉冲峰值功率 30.8 kW。实验结果表明,LD 端面抽运 Nd:YAP 内腔式 RTP-OPO 是获得 1.6 μm 波段激光的一种有效新途径。

### 参考文献:

[1] Bumham R L, Kasinki J J, Marshall L R. Eye-safe lase:

- US, 5181211[P]. 1993-01-19.
- [2] Rines G A, Rines D M, Moulton P F. Efficient, high-energy, KTP optical parametric oscillator pumped with 1 micron Nd-laser [C]//Conference on Lasers and Electro-Optics, 1993.
- [3] Chang Nick Wei-Han, Hosken David J, Munch Jesper, et al. Stable, single frequency Er:YAG lasers at 1.6 μm [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2010, 46(7): 1039-1042.
- [4] Zhang C, Shen D Y, Wang Y, et al. High-power polycrystalline Er:YAG ceramic laser at 1617 nm [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(24): 4767-4769.
- [5] Qu Yu, Li Yufei, Sun Yuming, et al. Diode-end-pumped 1.57 μm intracavity OPO[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(6): 684-686. (in Chinese)  
曲瑜, 李宇飞, 孙渝明, 等. LD端面泵浦的1.57 μm内腔OPO[J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(6): 684-686.
- [6] Li Shiguang, Li Huanhuan, Ma Xiuhua, et al. Nanosecond optical parametric oscillator with walkoff-compensating crystals [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(12): 3250-3252. (in Chinese)  
李世光, 李环环, 马秀华, 等. 走离补偿结构的纳秒脉冲光参量振荡器[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(12): 3250-3252.
- [7] Liu Xu, Cheng Yong, Wang Shuyun, et al. Application of prism resonator in 1.57 μm eye-safe OPO laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(S2): 352-356. (in Chinese)  
刘旭, 程勇, 王淑云, 等. 棱镜腔技术在1.57 μm人眼安全OPO激光器中的应用[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(S2): 352-356.
- [8] Zhao Jia, Dong Lei, Zhuo Zhuang, et al. High-repetition-rate RTP electro-optic Q-switched Nd:YAG laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(4): 648-650. (in Chinese)  
赵佳, 董磊, 卓壮, 等. 高重复率RTP电光调Q Nd:YAG激光特性研究[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(4): 648-650.
- [9] Li Yongliang, Zeng Youhong, Jiang Huilin, et al. LD-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> all solid-state RTP type matched 543 nm laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(6): 1024-1025. (in Chinese)  
李永亮, 曾佑洪, 姜会林, 等. LD泵浦Nd:YVO<sub>4</sub>全固态RTP II类匹配543nm激光器[J]. *红外与激光工程*, 2010, 39(6): 1024-1025.
- [10] Yu Y J, Jin G Y, Wang C, et al. All-solid-state continuous-wave doubly resonant all-intracavity cyan laser at 500.8 nm by sum-frequency-mixing in double-crystal RTP generation[J]. *Laser Physics Letters*, 2009, 6(7): 513-516.
- [11] W Koechner. Translated by Sun Wen et al. Solid-State Laser Engineering[M]. Beijing: Science Press, 2002: 23-56. (in Chinese)  
W 克希耐尔著, 孙文等译. 固体激光工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 23-56.
- [12] Albrecht H, Bonnin C, Gromfeld Y, et al. Characterization of RbTiOPO<sub>4</sub> crystal for electro-optic and non-linear applications [C]// European Symposium on Optics and Photonics for Defence and Security International Society for Optics and Photonics, 2005.
- [13] Duan Yanmin, Li Aihong, Chen Jing, et al. LD-end-pumped Nd:YAP laser operating at 1341.4 nm and doubling of its frequency [J]. *Journal of Russian Laser Research*, 2008, 29(3): 268-273.
- [14] Massey G A. Criterion for selection of cw laser host materials to increase available power in the fundamental mode[J]. *Applied Physics Letters*, 2003, 17(5): 213-215.