

文章编号: 0258-7025(2009)07-1789-04

高效大功率全固态 1.5 μm 腔内光参量振荡器

何京良 王瑞华 黄海涛 张百涛 杨见飞 董晓龙

(山东大学晶体材料国家重点实验室, 山东 济南 250100)

摘要 基于 KTA 和 KTP 非线性光学晶体, 在全固态大功率 1.5 μm 光参量振荡(OPO)方面做了相关的实验研究, 将激光二极管(LD)侧面抽运 Nd:YAG 1064 nm 高功率激光模块应用于腔内 KTA-OPO 设计中, 获得了高效稳定的光参量输出。当重复频率为 18 kHz 时, 1.53 μm 信号光功率和脉宽分别为 13 W 和 5.46 ns, 3.4 μm 闲光输出功率为 3 W。作为比较, 对基于 KTP 晶体的腔内光参量振荡特性也进行了实验研究。结果发现, 由于 KTA 晶体在 3.4 μm 波段的吸收相对 KTP 晶体来说可以忽略, 热效应的影响大为降低, 可获得比 KTP-OPO 更高的输出功率和转换效率。

关键词 激光技术; 光参量振荡; 人眼安全波长; KTA 晶体; 全固态激光

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093607.1789

Efficiency and High Power All-Solid-State 1.5 μm Intracavity Optical Parametric Oscillator

He Jingliang Wang Ruihua Huang Haitao Zhang Baitao Yang Jianfei Dong Xiaolong

(State Key Laboratory of Crystal Materials, Institute of Crystal Materials, Shandong University, Ji'nan, Shandong 250100, China)

Abstract The high power all solid state intracavity optical parametric oscillator (IOPO) at 1.5 μm eye-safe wavelength band based on KTA and KTP crystals is demonstrated. Under the repetition rate of 18 kHz, the optimum signal output power of 13 W at 1.5 μm with a 5.46 ns pulse width, and idler beam of 3 W at 3.4 μm were obtained using laser diode-side-pumped Nd:YAG 1064 nm high power laser as the KTA-IOPO pumping source. In addition, the characteristic of KTA-IOPO was compared with that of the similar crystal KTP. These results show that the absorption of 3.4 μm wavelength band in KTA was negligible compared with KTP crystal, allowing high-power and high-frequency-conversion operation with minimal thermally induced refractive distortion in the OPO crystal.

Key words laser technique; optical parametric oscillator; eye-safe wavelength; KTA crystal; all-solid-state lasers

1 引 言

大功率、高重复频率的 1.5~1.6 μm 人眼安全波段激光, 在军事、通信、空间测距、遥感、相干雷达、医疗(激光外科和成像)以及科学研究诸多领域都有着广泛而重要的应用。目前有多种技术途径获得这一波段的相干光源。相比于钕激光(包括钕玻璃, 910~1100 nm 抽运的 Er:Yb 光纤放大)、1.3 μm 抽运受激拉曼散射(SRS)产生频移等方法, 不论是从抽运技术、转换效率和热负载效应, 还是从可调谐

特性来说, 利用光参量振荡(OPO)技术, 将成熟的 Nd³⁺ 1 μm 激光辐射转换到 1.5 μm 波段是一种更为有效的技术手段^[1]。当然, 1.5 μm OPO 首先是得益于性能优良的 KTP、KTA 类的非线性光学晶体的出现^[2,3]。目前, 高重复频率、功率超过 10 W 的全固态 1.5 μm OPO 已多有报道。例如, Wu 等^[4]采用 LD 侧面抽运 Nd:YALO 声光调 Q 激光腔内抽运 KTA 晶体, 在 LD 功率为 570 W 时获得了平均功率 10.9 W, 1.5 μm 以及 4.1 W, 3.5 μm

收稿日期: 2009-03-27; 收到修改稿日期: 2009-04-12

基金项目: 国家自然科学基金(50721002, 60878012)和山东省自主创新重大科技专项计划(2006GG1103047)资助项目。

作者简介: 何京良(1957—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事全固态激光技术与器件及非线性光学等方面的研究。

E-mail: jlhe@sdu.edu.cn

的参量光输出,相应的 808 nm 抽运光向 1.5 μm 信号光转换效率为 1.91%。

KTA 晶体应用于 1.5 μm OPO,具有和同类晶体 KTP 相当大小的光损伤阈值(1.2 GW/cm^2)、角度和温度匹配带宽,其有效非线性光学系数略高于 KTP 晶体,在室温下同样可以实现非临界相位匹配(NCPM)。但是 KTA 晶体中红外透过截止波长为 5.3 μm ,比 KTP 晶体的 4.5 μm 透过截止波长向长波扩展了 800 nm,更重要的是 KTA 晶体在 3.0~5.0 μm 光谱范围内的吸收损耗远低于 KTP 晶体,因此它更适合应用于高重复频率、高功率近红外和中红外参量振荡器^[5]。基于 KTA 和 KTP 晶体,本实验室在全固态人眼安全波长光参量振荡方面做了相关的实验研究^[6~9]。本文把大功率 LD 侧面抽运的 Nd:YAG 1.064 μm 激光模块应用于腔内 OPO 中,研究了声光 Q 开关短脉冲 1.064 μm 抽运腔内 KTA-OPO 和 KTP-OPO 的 1.5 μm 激光输出,在此基础上,着重比较和分析了高重复频率、大功率情况下,两种非线性晶体在 OPO 运转中所表现出的激光特性。

2 实验装置

一般说来,OPO 对抽运光的功率密度要求是很高的,典型的抽运阈值强度大约为 $\sim 10 \text{ MW}/\text{cm}^2$,这对 $\sim 10 \text{ kHz}$ 高重复频率的声光调 Q 激光器来说往往难以达到。通过光束聚焦虽然可以使抽运光功率密度提高,但同时也受到非线性晶体接收带宽的限制,使晶体有效作用长度变短。腔内光参量振荡(IOPO)较好地解决了这一问题^[10,11]。实验装置如图 1 所示。平凹全反镜(M1)曲率半径为 800 mm,凹面对 1064 nm 全反(HR@1064 nm)。平面镜 M2 双面镀膜,左侧表面镀有 1064 nm 增透膜,右侧表面镀有 1064 nm 增透及 1534 nm 和 1572 nm 高反膜。平面输出镜 M3 表面镀有 1064 nm 高反膜和对 1534 nm 和 1572 nm 部分反射膜。M1 与 M3 构成 1064 nm 抽运光的谐振腔,长度为 200 mm。M2, M3 构成 OPO 谐振腔,长度为 30 mm。Nd:YAG 模块由激光二极管阵列组成,三个阵列围绕激光棒,阵列之间相互各成 120° 角排列,808 nm 抽运激光总功率为 240 W。Nd:YAG 晶体棒的尺寸为 $\phi 3 \text{ mm} \times 65 \text{ mm}$,掺杂原子数分数为 0.6%。KTA 晶体规格为 $4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$,通光方向为 25 mm,两通光面均镀 1064 nm 和 1534 nm 增透膜。KTA 晶体采用非临界相位匹配方式($\theta = 90^\circ$, $\varphi = 0^\circ$),将其用铝箔包裹后放入热沉中,保持较好的热接触,用恒温循环器控制循环水的

温度,使其保持在 25°C 。所用的声光开关的射频频率为 27 MHz,驱动功率为 50 W,重复频率为 1~50 kHz 可调。脉冲信号波形由数字示波器(Tektronix DPO7104, 1 GHz bandwidth, $5 \times 10^{-4} \text{ T/s}$ sampling rate)和光电接收器(New Focus, Model 1611)记录。

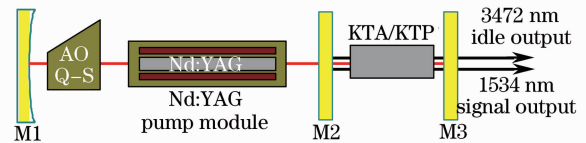


图 1 基于 Nd:YAG 模块的大功率 KTP-OPO 和 KTA-OPO 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the KTA-OPO and KTA-OPO based on the Nd:YAG module

3 实验结果与讨论

保持原有的腔长不变,撤去非线性晶体并将 M3 换成 $T=10\%$ @1064 nm 输出镜,首先研究了基于 Nd:YAG 模块的 1064 nm 脉冲激光的输出特性,相应的平均输出功率曲线如图 2 所示。在重复频率为 20 kHz、808 nm 抽运功率为 240 W 时,1064 nm 最大平均功率输出为 47.6 W,此时的脉宽为 78 ns,峰值功率为 31 kW,脉冲能量 2.38 mJ。高光束质量、高功率的抽运源为进行高效的参量转换提供了重要保证。

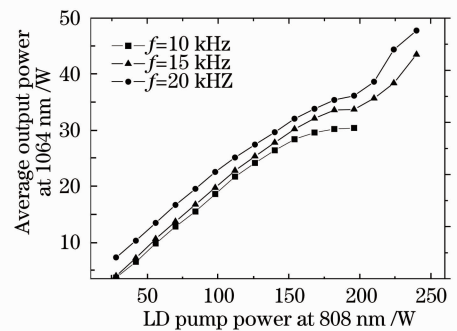


图 2 不同重复频率下 1064 nm 激光输出功率随抽运功率的变化关系

Fig. 2 Relationship between the average output power at 1064 nm and pump power under different repetition rates

将通光长度为 25 mm 的 KTA 晶体放入腔内并更换相应的 OPO 耦合输出镜,研究了 KTA-OPO 的运转特性。实验发现此时参量耦合输出镜的最佳透过率为 15%,图 3 给出了此种情况下信号光和休闲光的输出功率曲线。在重复频率 18 kHz 以及 LD 抽运功率 238 W 时,得到了 13.6 W 的 1534 nm

和 3 W 的 3472.7 nm 平均功率输出，相应的 808 nm 抽运光向 1534 nm 信号光的转换效率为 5.71%。信号光在水平和垂直方向的 M^2 因子分别测得为 5.3 和 4.4。考虑到在同样的抽运条件以及重复频率下对应的 1064 nm 激光功率约为 45 W，按此计算，则 1064 nm 抽运光到参量光的转换效率为 36.8%。获得这么高的转换效率的因素主要有两点：一是 1064 nm 抽运光的光束质量较好，这归功于小孔径的 Nd:YAG 棒以及优化的谐振腔参数设计；二则是归功于较长增益长度的优质 KTA 晶体。

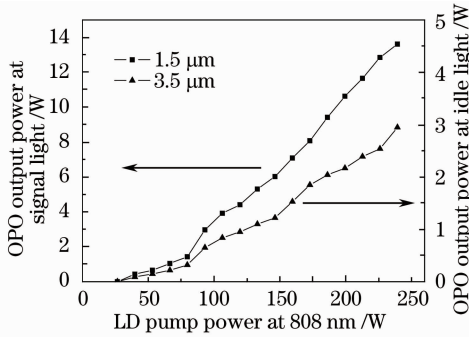


图 3 KTA-OPO 中 1534 nm 和 3472.7 nm 输出功率随 808 nm 抽运光的变化曲线

Fig. 3 Average output power at 1534 nm and 3472.7 nm versus the LD pump power for the KTA-OPO

作为比较，在保证其他参数不变情况下，将 KTA 换成通光长度 20 mm 的 KTP 晶体，进而研究了 KTP-OPO 的运转特性。图 4 给出了在 3 种不同耦合输出镜下，1572 nm 信号光平均输出功率随 LD 功率的变化情况。可以看出，采用最佳输出镜透过率为 10% 时，在 LD 抽运功率为 160 W，声光开关的重复频率为 6 kHz 情况下，1572 nm 的最大平均输出功率为 5.4 W，LD 抽运光到信号光的光-光转换效率为 3.40%。如果再进一步提升 LD 的抽运功率，信号光的输出功率不长反而下降，并且很不稳定。

需要说明的是，相对于 25 mm 的 KTA 晶体，

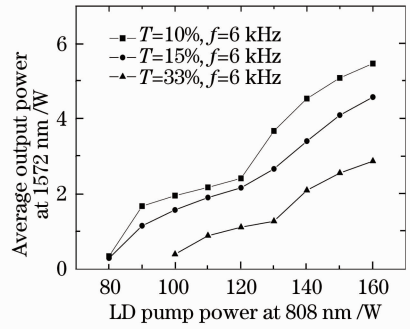


图 4 KTP-OPO 在不同的耦合输出镜下，1572 nm 平均输出功率随抽运功率的变化关系

Fig. 4 Average output power at 1572 nm versus the LD pump power for the KTP-OPO under different transmission output couplers

实验中所用的 KTP 晶体增益长度短了 5 mm，这也可能会影响 KTP-OPO 输出功率的提高，但是主要的还是因为 KTA 晶体在休闲光 (~3.5 μm) 波段相比于 KTP 晶体吸收很小，使腔内三波耦合作用得以增强，增益提高，信号光输出增大。从图 3 和图 4 中可以看到，KTA-OPO 中 LD 抽运功率可高达 240 W，而 KTP-OPO 中可利用的 LD 最大抽运功率只有 160 W，如果超过这个功率将导致 KTP 晶体发热，输出极不稳定，甚至造成晶体损伤。实验中 KTA-OPO 信号光输出功率的稳定性明显优于 KTP-OPO，对于 KTA-OPO，信号光最大平均输出功率在 1 h 内功率稳定度优于 1.42%，而 KTP-OPO 信号光在最大功率输出情况下稳定度为 2.5%。同时在最高输出功率时，对 KTA-OPO 和 KTP-OPO 信号光的脉宽进行了测试和比较，对前者 1534 nm 信号光脉宽为 5.46 ns，相应的信号光峰值功率和单脉冲能量分别为 138 kW 和 756 μJ，后者对应的 1572 nm 信号光脉冲宽度为 11 ns，相应的峰值功率和脉冲能量分别为 82 kW 和 900 μJ，脉冲波形如图 5(a) 和 (b) 所示。

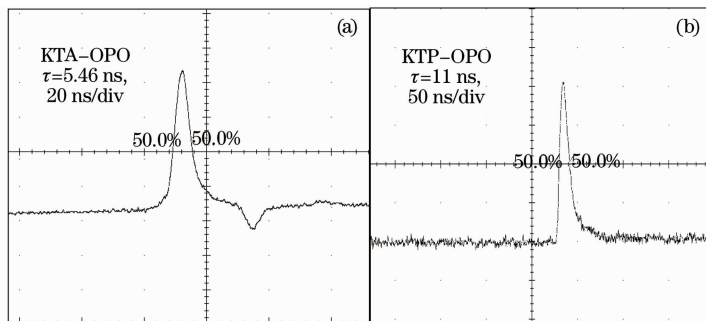


图 5 基于 Nd:YAG 模块 OPO 中得到的 1.5 μm 典型脉冲波形图
Fig. 5 Typical pulse shapes at 1.5 μm obtained in the high power OPO

实验过程中还可以看到,重复频率对 KTA-IOPO 和 KTP-IOPO 的输出特性会产生比较大的影响。在 LD 抽运功率一定的情况下,重复频率的增加会导致较高功率的信号光输出,但是当其增加到一定程度继续提高时又会导致信号光输出功率的下降,因此对于腔内 OPO 来说存在一个最佳的重复频率。对 KTA-IOPO 和 KTP-IOPO 来说,在 LD 抽运功率分别为 238 W 和 160 W 的情况下,最佳重复频率分别是 18 kHz 和 6 kHz。对此可作如下理解:提高声光开关的重复频率会对 OPO 的抽运光产生两方面的影响,一方面它将导致腔内 $1.064 \mu\text{m}$ 抽运光单位时间内脉冲数目的增加;另一方面其相应的脉冲宽度会变大,进而单脉冲能量以及峰值功率都会相应减小。刚开始增加重复频率时,前者的影响将占据主导地位,脉冲数目的增长将会使信号光的平均输出功率随之增加;继续提高重复频率会使后一方面的影响逐渐凸现并最终占据主导地位,此时信号光的输出功率则会相应下降。

综上所述,在全固态大功率、高重复频率 $1.5 \mu\text{m}$ OPO 应用中,不论是 OPO 的输出功率、转换效率,还是功率的稳定性,KTA 晶体都优于 KTP 晶体。这一现象同样可以解释为 KTA 晶体对休闲光的吸收损耗远小于 KTP 晶体,从而大大降低了热效应影响,使包括休闲光在内的三波耦合作用大为增强,提高了非线性频率转换效率。

4 结 论

KTP 和 KTA 晶体因其生长技术成熟,物理化学以及光学性能优良,被广泛应用于人眼安全波长光参量振荡器。基于 KTP 和 KTA 晶体,在大功率全固态人眼安全波长光参量振荡器方面做了相关的实验研究,采用 LD 侧面抽运 Nd:YAG 模块并结合腔内 KTA-OPO 技术,得到了 13.6 W 的 1534 nm 和 3 W 的 3472.7 nm 激光输出,相应的 808 nm 抽运光向 1534 nm 信号光的光-光转换效率为 5.71%。

通过实验比较,发现 KTA-OPO 在信号光输出功率的大小以及稳定度方面明显优于 KTP-OPO,这归功于 KTA 晶体对休闲光的吸收损耗远远小于 KTP 晶体,从而大大降低了热效应对非线性频率转换的影响。

致谢: 实验中所用 KTA 和 KTP 晶体由青岛海泰光电技术有限公司提供。

参 考 文 献

- 1 W. Zendzian, J. K. Jabczynski, J. Kwiatkowski. Intracavity optical parametric oscillator at 1572 nm wavelength pumped by passively Q-switched diode-pumped Nd:YAG laser [J]. *Appl. Phys. B.*, 2003, **76**: 355~358
- 2 Mark S. Webb, Peter F. Moulton, Jeffrey J. Kasinski *et al.*. High-average-power KTiOAsO₄ optical parametric oscillator [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(23): 1161~1163
- 3 K. Kato. Second-harmonic and sum-frequency generation in KTiOAsO₄ [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1994, **30**(4): 881~883
- 4 Rui Fen Wu, Kin Seng Lai, H. Wong *et al.*. Multiwatt mid-IR output from a Nd:YALO laser pumped intracavity KTA OPO [J]. *Opt. Express*, 2001, **8**(13): 694~698
- 5 G. C. Bhar, P. Kumbhakar, U. Chatterjee *et al.*. Tunable mid-infrared generation by difference frequency mixing KTiOAsO₄ [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1999, **38**(5): 2760~2763
- 6 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
- 7 H. T. Huang, J. L. He, X. L. Dong *et al.*. High-repetition-rate eye-safe intracavity KTA OPO driven by a diode-end-pumped Q-switched Nd:YVO₄ laser [J]. *Appl. Phys. B.*, 2008, **90**: 43~45
- 8 Dong Xiaolong, Zhang Baitao, He Jingliang *et al.*. High-power 1.5 and 3.4 μm intracavity KTA OPO driven by a diode-pumped Q-switched Nd:YAG laser [J]. *Opt. Commun.*, 2009, **282**: 1668~1670
- 9 B. T. Zhang, X. L. Dong, J. L. He *et al.*. High-power eye-safe intracavity KTA OPO driven by a diode-pumped Q-switched Nd:YAG laser [J]. *Laser Phys. Lett.*, 2008, **5**(12): 869~873
- 10 Xiao Guanghua, 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
- 11 Peng Xiaoyuan, Xu Lei, Anand Asundi. High efficient high-repetition-rate tunable all-solid-state optical parametric oscillator [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2005, **41**(1): 53~61