

文章编号:1001-5078(2007)01-0048-03

KTA 和 KTP 晶体参量激光特性研究

李晓敏¹, 卓 壮^{1,2}, 李 涛¹, 程文雍¹

(1. 山东师范大学物理与电子科学学院, 山东 济南 250014; 2. 山东大学山大鲁能信息科技有限公司, 山东 济南 250100)

摘 要:讨论了激光二极管阵列(LDA)侧面泵浦声光调Q Nd:YAG 内腔式光学参量振荡器(OPO)的阈值特性;在相同的实验条件下,对比分析了KTA和KTP晶体参量激光输出特性。当声光重复频率为4kHz,输出镜透过率为30%,泵浦电流为14.5A时,波长为1.57 μm ,KTA晶体参量激光平均输出功率最大为613.4mW,脉冲宽度约2.5ns,峰值功率超过61kW。

关键词:内腔式光学参量振荡器;声光调Q;KTA晶体;KTP晶体

中图分类号:TN244 **文献标识码:**A

Study on the Optical Parametric Properties of KTA and KTP Crystals

LI Xiao-min¹, ZHUO Zhuang^{1,2}, LI Tao¹, CHENG Wen-yong¹

(1. College of Physics and Electronics, Shandong Normal University, Jinan 250014, China;
2. Shanda Luneng Information & Technology Co., Ltd., Shandong University, Jinan 250100, China)

Abstract: The threshold formula of an acousto-optically (AO) Q-switched Nd:YAG intracavity optical parametric oscillator(OPO), side pumped by laser diode arrays, is studied. At the same experimental condition, the optical parametric properties of KTA and KTP crystals are analyzed. At the repetition rate of 4kHz, output mirror transmission of 30%, input current of 14.5A, the KTA OPO generated the highest average output power of 613.4mW at 1.57 μm with pulse width of 2.5ns and the peak power of 61kW.

Key words: intracavity optical parametric oscillator; AO Q-switch; KTA crystal; KTP crystal

1 引言

近年来,以 KTiOPO_4 (KTP)、 KTiOAsO_4 (KTA)、 LiB_3O_4 、 BaBO_3 等为代表的新型优质非线性晶体的出现和泵浦激光器光束质量的改进,促进了OPO激光技术的崛起,使得内腔式光参量振荡器(OPO)实现了结构紧凑、设计简单、低阈值和高转换效率等特点,其应用价值受到越来越多的关注^[1-2]。

KTP晶体是近年来出现的适用于Nd激光器频率转换的最好非线性晶体材料之一,在II类非临界相位匹配点($\theta = 90^\circ, \phi = 0^\circ$)处^[3],晶体的有效非线性系数最大(约为3.64pm/V),无走离效应,且接收角最大(约为3.2°),大大超过泵浦光束衍射极限。非临界相位匹配的接收角比临界相位匹配的接收角大一个数量级,对于发散角较大的泵浦源,有较大的容纳范围,因此采用非临界相位匹配方式易于获得

较高的参量转换效率^[4-6]。

在KTP中以As取代P,得到一种新型非线性晶体材料KTA,与KTP属同晶系,KTA与KTP晶体有几乎相同的非线性系数和高损伤阈值,而且KTA的透光范围扩大到红外部分,表1给出了两种晶体的主要特性参数。此外,在3~5 μm 波段内KTA的吸收损耗远低于KTP^[7],从而降低了热透镜及热效应对腔的稳定性和光束质量的影响,预计可以有效地提高转化效率。

实验首次采用LD阵列侧面泵浦的Nd:YAG激光器作为泵浦源,对比研究了1.57 μm 内腔式KTA和KTP晶体的参量激光输出特性。在声光重复频

基金项目:山东省科技厅科技攻关计划资助项目(031080125)。

作者简介:李晓敏,女,硕士研究生,主要从事全固态激光器件和非线性光学等方面的研究。

收稿日期:2006-05-12

率为 4kHz, 泵浦电流为 14.5A, 输出镜透过率为 30% 时, KTA OPO 获得了 1.57 μm 参量激光, 其最大平均输出功率为 613.4mW, 脉冲宽度约为 2.5ns, 峰值功率超过 61kW。

表 1 KTP/KTA 的主要特性参数

	$d_{\text{eff}}/$ ($\text{pm} \cdot \text{V}^{-1}$)	transparency / μm	damage threshold/ ($\text{GW} \cdot \text{cm}^{-2}$)	typical length/cm
KTP	3.64	0.4~3.5	0.5	1~2
KTA	4.47	0.4~4.0	0.5	1~2

2 实验装置

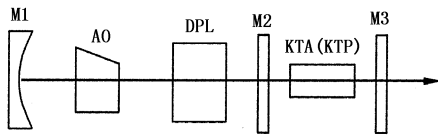


图 1 实验装置示意图

Fig.1 schematic diagram of experimental setup

图 1 为实验装置示意图。M₁ 为凹面镜, 内表面镀有 1.06 μm 全反膜, 曲率半径为 50cm; M₂ 为一平面镜, 双面镀膜, 左表面镀有 1.06 μm 增透膜, 右表面镀有 1.06 μm 增透膜和 1.57 μm 高反膜; M₃ 为一平面输出镜, 内表面镀有 1.06 μm 高反膜和对 1.57 μm 的部分透过介质膜。M₁ 与 M₃ 构成 1.06 μm 基频泵浦光的谐振腔, 腔长为 30cm; M₂ 与 M₃ 构成光学参量谐振腔, 腔长为 3cm。DPL 为北京海特光电有限公司生产的 DPL-1064-S1-0050 型半导体激光泵浦的固体激光模块, 模块中的工作物质为 $\phi 3\text{mm} \times 75\text{mm}$ 的 Nd:YAG 棒, 周围为对称泵浦的二极管阵列。声光调 Q 器件 (AO) 插入损耗小于 5%, 内调制频率 1~10kHz 连续可调。实验所用的非线性晶体 KTA 和 KTP 为山大鲁能中晶公司生产, KTA 晶体尺寸为 5mm \times 5mm \times 25mm, KTP 尺寸为 4mm \times 4mm \times 25mm, 分别镀有对 1.06 μm 和 1.57 μm 的双增透膜, 紧靠输出镜放置。AO 和 DPL 模块均由冷却系统温控于 23 $^{\circ}\text{C}$ 。

3 实验结果与分析

OPO 的转化效率与非线性晶体中泵浦光强度有密切关系。泵浦光强度偏高, 对应信号光转换效率高, 但随着光学参量谐振腔内泵浦功率密度增大, 极易导致非线性晶体和腔镜的光学损伤^[8]。根据“经验法则”, 泵浦光强度 I_p 应不小于 4 倍阈值泵浦强度 I_{th} , 即 $I_p \geq 4I_{\text{th}}$ 。因此, 降低腔内阈值泵浦功率密度, 是避免晶体和腔镜光学损伤的重要措施。对于本实验所用的内腔式光学参量谐振腔, 由于输出镜对 3.3 μm 的空闲光有较高的透过率, 3.3 μm 的空闲光不能起振, 所以可以认为该谐振腔是只对 1.57 μm 信号光谐振的单谐振振荡器, 这种单谐振振荡器的阈值条件为^[9]:

$$I_{\text{th}} = \frac{1.12\lambda_s\lambda_i n_s n_i n_p \epsilon_0 c}{8\pi^2 d_{\text{eff}}^2 g l_{\text{eff}}^2 (1 + \gamma)^2} \left(\frac{L}{t_p c} \ln \frac{P_s}{P_n} + 2\alpha l + \ln \frac{1}{\sqrt{R}} + \ln 4 \right)^2 \quad (1)$$

式中, I_{th} 为非线性晶体中阈值泵浦光的功率密度; d_{eff} 为有效非线性系数; n_p, n_s, n_i 分别是三种光的折射率; λ_s, λ_i 为信号光和空闲光的波长; g 是信号空间模耦合系数, 其定义为 $g = 1/[1 + (\omega_s/\omega_p)^2]$; l_{eff} 为有效的参量增益长度, 在非临界相位匹配条件下, l_{eff} 可认为等于晶体的长度; γ 为晶体后向与前向泵浦光强度之比; t_p 为泵浦脉冲 ($1/e^2$) 强度的全宽度; L 为光学参量谐振腔的腔长; p_s 和 p_n 分别为阈值信号功率和噪声功率; αl 为腔内损耗; R 为输出镜的反射率。从阈值公式 (1) 可以看出, 有效非线性系数 d_{eff} , 有效参量增益长度 l_{eff} , 光学参量谐振腔的腔长 L , 输出镜透过率 $(1 - R)$, 泵浦脉冲宽度 t_p 是获得参量振荡低阈值的关键。

实验采用 LP-3C 型激光功率计对 1.57 μm 输出光的平均功率进行测量。图 2 为输出镜透过率为 15%, 声光重复频率为 2kHz 时, KTA 和 KTP 晶体参量激光的平均输出功率随泵浦电流的变化情况。

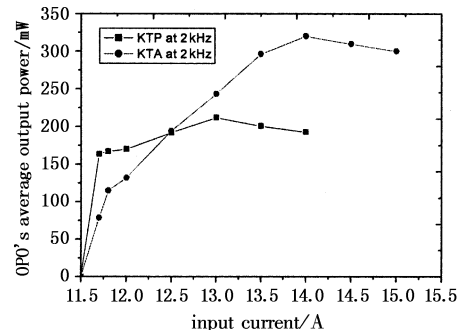


图 2 KTA 和 KTP 晶体参量激光输出功率曲线

Fig.2 the output property of KTA and KTP crystal at 2kHz

可以看出, 同样实验条件下, KTA 晶体参量激光的转化效率和稳区范围均明显高于 KTP 晶体参量激光。主要因为 KTA 晶体对 3.2 μm 空闲光的吸收小, 晶体热效应小, 相应谐振腔更稳定, 光束质量高, 有效地提高了 KTA 晶体的转化效率。由于参量激光的转化效率与泵浦光功率密度 I 和阈值光功率密度 I_{th} 的比值有关; 只有 I/I_{th} 达到一特定值, 转化效率才达到最大值; 超过该特定值, 信号光场和空闲波场逆向耦合到泵浦场, 转化效率降低。此外, 随着泵浦功率的升高, 非线性晶体对空闲光的吸收更加明显, 导致晶体热效应加剧, 从而使转化效率受到影响, 导致输出特性曲线末端存在一极值点。

图 3 为输出镜透过率为 15%, 声光重复频率分别为 4kHz、6kHz、8kHz、10kHz 时, KTA 晶体参量激

光的平均输出功率随泵浦电流的变化情况。实验表明声光工作频率较低时,OPO的泵浦阈值也较低。因为当声光低频工作时,1.06 μm 泵浦光脉冲的峰值功率升高,促使振荡阈值降低。

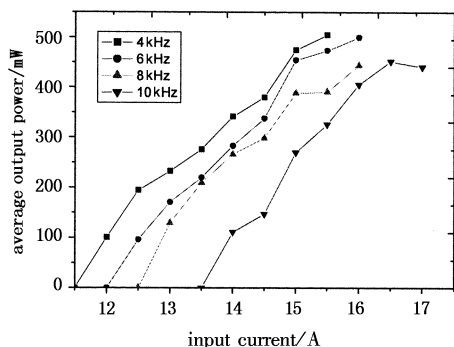


图3 不同声光重复频率下KTA晶体参量激光平均输出功率曲线

Fig. 3 average output power at different repetition

图4为声光重复频率为4kHz,输出镜透过率分别为15%、20%、30%时,KTA晶体参量激光的平均输出功率随泵浦电流的变化特性。当输出镜的透过率较低时,OPO的振荡阈值也较低。阈值公式(1)表明:输出镜的透过率降低,阈值功率密度 I_{th} 相应降低;随着透过率的升高,虽然阈值会有所升高,但曲线的斜效率也会随之升高,因为透过率高有利于1.57 μm 参量光的输出,有效阻碍了逆转换的发生。当输出镜的透过率为30%时,实验获得了1.57 μm 参量激光最大平均输出功率为613.4mW。

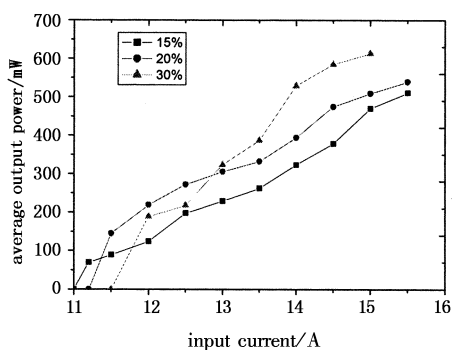


图4 不同输出镜透过率时KTA晶体参量激光平均输出功率与泵浦电流的关系

Fig. 4 average output power versus the incident current with different output mirrors

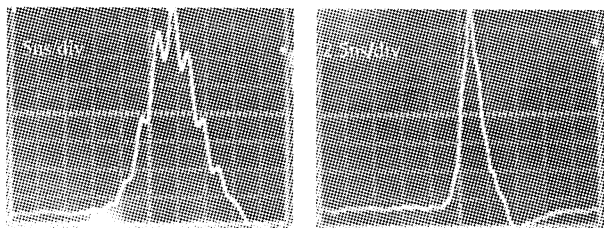


图5 (a)KTP OPO输出脉冲波形 (b)KTA OPO输出脉冲波形
实验中用Tektronix公司的TDS5104示波器记

录波形,如图5(a)、(b)所示。在输出镜透过率为30%,声光重复频率为4kHz,泵浦电流为14A时,KTP晶体参量激光的输出脉宽为8ns,而KTA晶体参量激光的输出脉宽只有3ns,继续增大电流至14.5A时,其脉宽减小到2.5ns。

KTA晶体参量激光的输出脉宽远小于KTP晶体参量激光的。其原因是KTA晶体对空闲光的吸收小,热效应小,由热效应引起的泵浦光的发散及相位失配相应减小,而OPO的线宽与泵浦光的发散角、相位失配成正比关系。综上所述,KTA晶体的参量激光无论是在稳定性、转化效率、峰值功率等方面都要优于KTP晶体的参量激光,所以KTA晶体比KTP晶体更适合用于产生参量振荡激光。

4 结论

首次采用LD阵列侧面泵浦的Nd:YAG激光器作为泵浦源,在相同的条件下比较了KTA和KTP晶体OPO输出特性,实验证明,KTA晶体的参量激光特性优于KTP晶体,测量了不同声光重复频率和不同输出镜透过率下KTA晶体的参量激光输出特性,分析了声光重复频率和输出镜透过率对OPO泵浦阈值的影响。在KTA OPO实验中,当声光重复频率为4kHz,输出镜透过率为30%,获得了1.57 μm 的最大平均输出功率为613.4mW,脉冲宽度仅为2.5ns,峰值功率超过61kW。由于实验条件限制,OPO的转化效率不是很高。因此提高OPO的转化效率,获得更大的1.57 μm 参量激光输出,将是我们今后研究的重点。

参考文献:

- [1] 包照日格图,荀滔,韩隆,等.小型人眼安全OPO激光器[J].激光与红外,2003,33(03):190-191.
- [2] Yashkir Y, Dricl H M. Passively Q-Switched 1.57 μm intracavity optical parametric oscillator [J]. Appl. Opt., 1999,38:2554-2559.
- [3] 保爽,巩马理,陈刚,等.高光束质量人眼安全OPO激光器[J].激光与红外,2003,33(05):343-345.
- [4] R P Jones. Solid State Lasers and Nonlinear Crystals [A]. Proc. SPIE,1995,2379:357.
- [5] B K Vainshtein. Fundamentals of Crystals [M]. Mod. Crystallography, Springer, Berlin Heidelberg 1994,1.
- [6] 金锋,翟刚,李晶,等.全固态人眼安全OPO激光器[J].激光技术,2002,26(03):201-203.
- [7] L K Cheng, L T Cheng, J D Bierlein, et al. Properties of doped and undoped crystals of single domain KTiOAsO_4 [J]. Appl. Phys. Lett., 1993,62:346-348.
- [8] 陈波,程勇.加固型人眼安全OPO激光器的设计[J].激光技术,2004,28(01):91-93.
- [9] W 克希耐尔.固体激光工程[M].第五版.北京:科学出版社,2002,545-546.