

文章编号: 0258-7025(2006)10-1305-04

激光二极管侧面抽运声光调 Q Nd:YAG/KTA 1.57 μm 人眼安全光参量振荡激光器

李 涛¹, 卓 壮^{1,2}, 李晓敏¹, 姜其畅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 利用激光二极管(LD)阵列侧面抽运声光(AO)调 Q 的 Nd:YAG 激光器作为抽运源,研究了在不同声光重复频率和输出镜透过率的情况下,内腔式 KTA-光参量振荡器(OPO)的输出特性。通过对单谐振光参量振荡器阈值公式的讨论,采用平凹腔的结构以及较短的腔长,降低了光参量振荡器的振荡阈值。当声光重复频率为 4 kHz,输出镜透过率为 30%,抽运电流为 14.5 A 时,光参量振荡器的 1570 nm 激光输出脉冲峰值功率达到 5.6×10^4 W,脉冲宽度为 2.5 ns,实验中最大平均输出功率为 560.3 mW。结果表明,具有良好热性能的非线性晶体 KTA 是制造小型、轻便光参量振荡激光器的理想材料。

关键词 激光技术;光参量振荡器;激光二极管侧面抽运;声光调 Q;KTA 晶体

中图分类号 TN 248.1 文献标识码 A

Laser Diode-Side-Pumped Acousto-Optic Q-Switched Nd:YAG/KTA Eye-Safe Optical Parametric Oscillator

LI Tao¹, ZHUO Zhuang^{1,2}, LI Xiao-min¹, JIANG Qi-chang¹, CHENG Wen-yong¹

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

Abstract An intracavity KTiOAsO₄ (KTA) optical parametric oscillator (OPO) pumped by a laser diode array side-pumped, acousto-optically (AO) Q-switched Nd:YAG laser is investigated. The output performance of KTA-OPO is tested at different repetition rates and transmissions of the output mirror. Through discussion of the threshold formula of the singly resonant OPO, a plane-concave cavity and a short OPO cavity length are employed to decrease the OPO's pumping threshold. The parameters of output laser have been measured at different repetition rates and transmissions of the output mirror. When the repetition rates of acousto-optic Q-switch and transmission of output mirror are 4 kHz and 30% respectively, the output peak power of 1570 nm wavelength reaches 5.6×10^4 W with the pulse width of 2.5 ns. The highest average output power of 560.3 mW is obtained. KTA is a kind of ideal material used to make pocket and portable OPO laser.

Key words laser technique; optical parametric oscillator; laser diode-side-pumped; acousto-optic Q-switch; KTA crystal

1 引 言

利用光参量振荡器(OPO)技术获得的 1570 nm 激光具有大气红外窗口、对烟雾穿透能力强和人眼

安全等独特优点,在激光雷达、激光测距、激光预警等应用领域倍受重视^[1~4]。近十年来,非线性晶体研究的重大突破促使光参量振荡激光器进入实用阶段。特别是以 KTP, KTA, LBO 等为代表的新型优

收稿日期:2006-03-14;收到修改稿日期:2006-05-12

基金项目:山东省科技厅科技攻关计划(031080125)资助项目。

作者简介:李 涛(1981—),男,山东枣庄人,山东师范大学硕士研究生,主要从事全固态激光器件方面的研究。E-mail: z. zhuo@sduln. com. cn

导师简介:卓 壮(1967—),男,江苏徐州人,山东大学教授,硕士生导师,主要从事新型光学晶体、非线性光学晶体、半导体激光抽运固体激光器和晶体器件的非线性光学特性等的研究。E-mail: z. zhuo@sduln. com. cn

质非线性晶体的出现,促进了光参量振荡器激光技术的崛起^[5,6]。

KTA是一种与KTP同晶系的新型非线性材料,具有激光损伤阈值高、激光入射允许角大和相位匹配稳定等特性,获得了越来越广泛的应用^[7,8]。在3~5 μm波段内KTA的吸收损耗远低于KTP,从而降低了热透镜和发热效应,提高了腔的稳定性和输出光束的质量^[9]。

本文利用激光二极管(LD)阵列侧面抽运声光(AO)调Q的Nd:YAG激光器作抽运源,研究了内腔式KTA-光参量振荡激光器在不同声光重复频率和输出镜透过率情况下的1570 nm激光输出特性。

2 实验装置

实验装置如图1所示。 M_1 为凹面镜,曲率半径500 mm,内表面镀有1064 nm全反膜。平面镜 M_2 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1570 nm高反膜。平面输出镜 M_3 内表面镀有1064 nm高反膜和对1570 nm部分透过介质膜。 M_1 与 M_3 构成1064 nm抽运光的谐振腔,腔长为30 cm; M_2 , M_3 构成光参量振荡器谐振腔,腔长为3 cm。KTA晶体为山东大学鲁能中晶公司生产,尺寸为6 mm×6 mm×26.7 mm,两通光面均镀1064 nm和1570 nm增透膜。为在KTA晶体中得到尽可能高的抽运光能量密度,将其紧靠输出镜放置。实验中所用激光头为北京海特光电有限公司生产的DPL-1064-S1-0050型半导体激光抽运固体激光模块,工作物质为φ3 mm×75 mm的Nd:YAG棒,Nd离子掺杂原子数分数为1%,激光二极管阵列从三向对称抽运。激光二极管抽运的固体激光器(DPL)模块中激光二极管阵列的电源为北京吉泰光科技开发有限公司生产的GTS2030-T-R型激光电源,此电源的电流-电功率数值对照如表1所示。Q开关采用QS27-5S-B型GOOCH&HOUSEGO声光头,工作介质为优质熔融硅(Fused Silica),工作波长为1064 nm,中心频率为27 MHz,插入损耗小于5%,声光晶体两通光面镀1064 nm增透膜(反射率小于0.2%),内调制频率1~10 kHz连续可调。

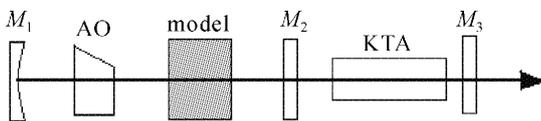


图1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

声光晶体以及激光二极管抽运的固体激光器模块均使用水循环冷却系统将温度控制于23 ℃。

表1 激光二极管电源的电流与输出电功率对照表

Table 1 Electric power versus the input current

Input current /A	11	12	13	14	15	16
Electric power /W	209	229.2	249.6	270.2	291	312

3 结果与分析

实验中采用的光参量振荡激光器是对1570 nm信号光谐振,对1064 nm抽运光全反的单谐振振荡器(SRO)。其阈值条件为^[6]

$$I_{th} = \frac{1.12}{kg_s l_{eff}^2 (1 + \gamma)^2} \times \left(\frac{L}{t_p c} \ln \frac{P_s}{P_n} + 2\alpha l + \ln \frac{1}{\sqrt{R}} + \ln 4 \right)^2, \quad (1)$$

式中 I_{th} 为非线性晶体中抽运光的阈值功率密度, k 为耦合常数, g_s 为信号空间模耦合系数, l_{eff} 为有效的参量振荡长度, γ 为晶体内向与向前的抽运光强度之比, L 为腔的长度, t_p 为抽运脉冲($1/e^2$)强度的全宽度, c 为光速, P_s 为阈值信号功率, P_n 为噪声功率, αl 为腔内损耗, α 为损耗系数, l 为晶体长度。 R 为输出镜的反射率。从(1)式可以看出为降低光参量振荡器阈值,应尽可能缩短腔长。采用平凹腔结构,把KTA晶体置于输出镜端靠近束腰处,一方面,可以增加有效参量振荡长度,另一方面,由于束腰处光斑半径最小增大了晶体内的1064 nm抽运光功率密度。

使用LP-3C型激光功率计测量在输出镜对1570 nm透过率为15%,声光重复频率分别为4 kHz,6 kHz,8 kHz,10 kHz时,平均输出功率随抽运电流 I 的变化如图2所示。

可以看出,声光重复频率较高时,光参量振荡器的振荡阈值随之增大。这是因为在相同抽运条件下声光重复频率的提高,会导致1064 nm抽运光脉冲的峰值功率降低,为达到光参量振荡器所需的脉冲峰值功率,在其他实验条件不变时,必然要提高抽运电流,从而使得光参量振荡器振荡阈值增大。在相同抽运电流下,声光重复频率为4 kHz时光参量振荡器输出功率最大。究其原因,所用抽运激光模块工作介质为Nd:YAG晶体,其上能级荧光寿命为230 μs,与Q开关重复频率为4 kHz时的关断时间(250 μs)接近,此时工作介质上能级反转粒子数密度最大,从而在相同的抽运电流下重复频率为

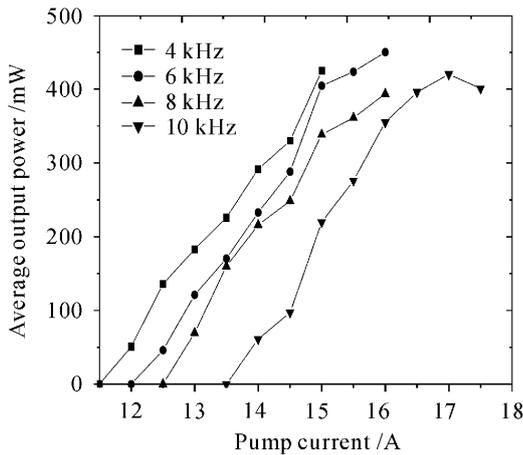


图 2 不同声光重复频率下光参量振荡器平均功率输出曲线

Fig. 2 OPO average output power at different repetition rates

4 kHz时得到了最大平均功率输出。随着抽运电流的增大,输出功率曲线走势趋于平缓,继续增大电流甚至还会下降。主要原因为:对于单谐振光参量振荡器在近似于平面波的理想条件下转换效率为 $\eta = \sin^2 \sqrt{kI_p}l$, 式中 I_p 为抽运光通量。由转换效率公式可以看出,只有当抽运光功率密度达到某一特定值时,光参量振荡器的转换效率才会达到最大。超过这个值,信号光功率开始耦合回到抽运光场,转换效率随之降低,导致功率曲线走势下降。另一方面,高功率时由于晶体热效应会影响谐振腔的稳定性,使得1064 nm抽运光的模式变坏,参量振荡过程中相位失配,导致输出功率下降。

图 3 为在声光调 Q 重复频率为 4 kHz 时,使用

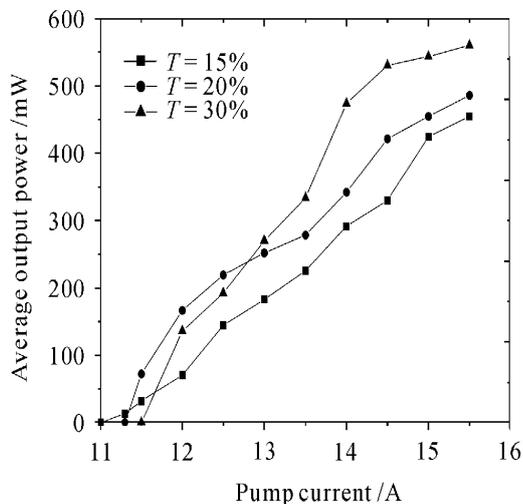


图 3 输出镜透射率不同时光参量振荡器平均输出功率与注入电流的关系

Fig. 3 OPO average output power versus the incident current with different transmissions of the output mirrors

对1570 nm透射率 T 分别为 15%, 20% 和 30% 的输出镜时,输出功率随抽运电流的变化。

如图 3 所示,采用低透过率输出镜时(比如 $T = 15\%$),光参量振荡器的振荡阈值较低(抽运电流约为 11 A),这与阈值条件公式相符合。采用高透射率的输出镜时功率曲线的斜效率随之升高。这是因为高透射率利于 1570 nm 光的输出,有效地阻碍了逆转换的发生。对应于透射率为 30% 的输出镜,获得了 560.3 mW 的平均输出功率。

声光重复频率为 4 kHz,输出镜透过率为 30% 时,输出光脉冲宽度以及脉冲峰值功率随抽运电流的变化曲线如图 4 曲线 A 所示。可以看出,声光重复频率一定时,随着抽运电流的增大,光参量振荡器输出脉冲宽度逐渐变小,达到极小值。继续增大抽运电流,脉宽逐渐变大。这是因为抽运电流增大时激光介质上能级反转粒子数密度增加,导致 1064 nm 抽运光脉冲的建立过程缩短,形成脉宽较窄峰值功率较高的抽运光脉冲。受此影响,信号光脉冲宽度随之变窄。继续增加抽运电流,由于热效应的影响,使得抽运光的发散角 φ , 相位失配 Δk 变大,而光参量振荡器振荡线宽几乎正比于 φ 及 Δk , 从而致使线宽增大。另一方面,随着腔内 1064 nm 抽运光功率的提高,声光开关不能有效关断,造成抽运光脉宽增宽,使得信号光脉宽随之增宽。而脉冲峰值功率 $P_{\text{peak}} \propto P_0 / \Delta\tau$, 其中 P_0 为激光器平均输出功率, $\Delta\tau$ 为 1570 nm 激光脉冲宽度,峰值功率曲线与脉宽曲线变化趋势相反,如图中曲线 B 所示。

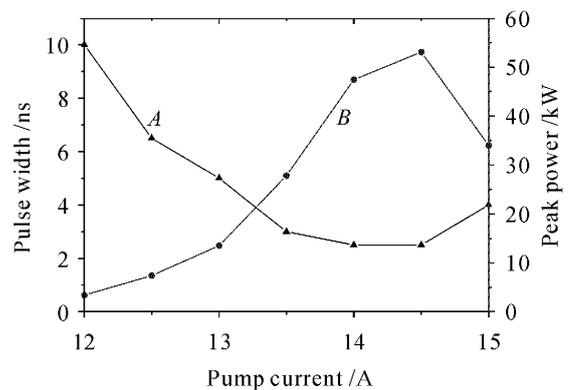


图 4 脉冲宽度(A)、脉冲峰值功率(B)与注入电流的关系

Fig. 4 Pulse width (A), peak power (B) versus the incident current

用 Tektronix 公司的 TDS5104 示波器记录光参量振荡器波形。在重复频率为 4 kHz,输出镜透过率为 15%,抽运电流为 13 A 时得到了脉宽 5 ns 的

输出光脉冲。进一步增大抽运电流到14.5 A,光参量振荡器输出出现了次脉冲,如图5(a)所示,此时虽然主脉冲的脉宽变窄,但由于次脉冲分得部分能量(约占总输出功率的1/3),脉冲峰值功率难以提高。图5(b)为换用透射率为30%的输出镜,相同的声光重复频率下,在抽运电流为14 A时得到了脉宽为3 ns的输出波形,继续增大抽运电流可使脉宽减小到2.5 ns。

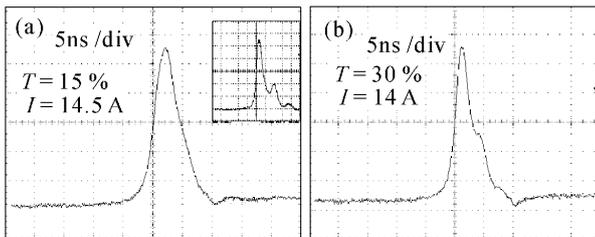


图5 输出脉冲波形图

Fig. 5 Output pulse shape

4 结 论

KTA 晶体具有良好的热效应,在不采用任何冷却手段的情况下仍能长时间稳定地工作,是制造小型、轻便光参量振荡器的理想材料,在军事等领域有很大的应用前景。由于本实验激光二极管抽运的固体激光器模块采用侧面抽运,输出信号光的光束质量会有所下降,如何得到较高光束质量人眼安全光参量振荡器有待进一步研究。

参 考 文 献

- 1 L. R. Marshall, A. Kaz. Eye-safe output from noncritically phase matched parametric oscillators [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1993, **10**(9):1730~1736
- 2 Pei Bo, Bao Zhaorigetu, Zhou Yun *et al.*. Experimental investigation of beam divergence in intracavity KTP OPOs [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(1):13~15
裴博,包照日格图,周韵等. 内腔式KTP OPO发散角的实验研究[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(1):13~15
- 3 Youlun Ju, Baoquan Yao, Sheng Qi. High power 1.57- μm OPO pumped by MOPA with SBS [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(6):358~361
- 4 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
- 5 Sang Mei, Xue Ting, Yu Jian *et al.*. The characteristics of optical parametrical oscillator in periodically poled KTiOPO₄ crystal [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(11):1286~1290
桑梅,薛挺,于健等. 周期极化KTP晶体光参量振荡特性研究[J]. *光子学报*, 2003, **32**(11):1286~1290
- 6 Yao Jianquan. *Nonlinear Optics Frequency Conversion and Laser Tuning Technology* [M]. 1st edition. Beijing: Science Press, 1995. 161
姚建铨. *非线性光学频率变换及激光调谐技术*[M]. 第一版. 北京:科学出版社,1995. 161
- 7 L. K. Cheng, L. T. Cheng, J. D. Bierlein *et al.*. Properties of doped and undoped crystals of single domain KTiOAsO₄ [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **62**(4):346~348
- 8 W. Koechner. *Solid-State Laser Engineering* [M]. 5rd edition. Beijing: Science Press, 2002. 555~556
[美]W. 克希耐尔. *固体激光工程*[M]. 第五版. 北京:科学出版社, 2002. 555~556
- 9 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