

文章编号: 0258-7025(2010)11-2762-04

# 百毫焦腔内 KTP 光参量振荡 $2\ \mu\text{m}$ 脉冲激光器

魏星斌<sup>1,2</sup> 彭跃峰<sup>1</sup> 王卫民<sup>1</sup> 陈兴无<sup>1</sup> 刘 东<sup>1</sup> 李德明<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)  
(<sup>2</sup> 中国工程物理研究院研究生部, 四川 绵阳 621900)

**摘要** 报道了一台高单脉冲能量的光参量振荡(OPO) $2\ \mu\text{m}$  固体激光器。采用电光调 Q, Nd:YAG 激光器输出的 1064 nm 激光, 抽运腔内两块光轴方向相向放置的 KTP 晶体, 通过双谐振光参量振荡(DROPO)技术获得  $2\ \mu\text{m}$  激光输出。OPO 谐振腔由  $2\ \mu\text{m}$  反射镜、两块走离补偿的 KTP 晶体和  $2\ \mu\text{m}$  输出镜组成。KTP 晶体尺寸为  $8\ \text{mm} \times 8\ \text{mm} \times 15\ \text{mm}$ , 切割角  $\theta = 53^\circ$ ,  $\varphi = 0^\circ$ 。OPO 采用 II 类相位匹配( $o \rightarrow o + e$ )。当激光二极管单脉冲能量为 1.02 J, 电光 Q 开关频率为 30 Hz 时, 获得了单脉冲能量 107 mJ 的简并波长  $2.1\ \mu\text{m}$  激光输出, 808 nm 激光二极管到  $2.1\ \mu\text{m}$  光-光转换效率为 10.5%, 光束质量因子分别为  $M_x^2 = 2.38$ ,  $M_y^2 = 1.56$ 。

**关键词** 激光器;  $2\ \mu\text{m}$  激光器; 光参量振荡器; KTP 晶体

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL20103711.2762

## 2 $\mu\text{m}$ Pulsed Laser with 100 mJ Intracavity KTP Optical Parametric Oscillator

Wei Xingbin<sup>1,2</sup> Peng Yuefeng<sup>1</sup> Wang Weimin<sup>1</sup> Chen Xingwu<sup>1</sup> Liu Dong<sup>1</sup> Li Deming<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)  
(<sup>2</sup> Graduate School of China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

**Abstract** A high energy optical parametric oscillated (OPO)  $2\ \mu\text{m}$  pulsed solid-state laser is demonstrated. The  $2\ \mu\text{m}$  laser is generated through a doubly resonant intracavity KTP OPO pumped by an electro-optic (EO) Q-switched Nd:YAG laser. The OPO resonator is composed of a  $2\ \mu\text{m}$  high reflection mirror, two walk-off compensated KTP crystals and a  $2\ \mu\text{m}$  output mirror. OPO is realized by the type II phase matching( $o \rightarrow o + e$ ). Both KTP crystals are cut as  $\theta = 53^\circ$ ,  $\varphi = 0^\circ$ , and have a volume of  $8\ \text{mm} \times 8\ \text{mm} \times 15\ \text{mm}$ . When the energy of the diode laser is 1.02 J and the repetition rate of the EO Q-switch is 30 Hz, the highest single pulsed energy of the  $2.1\ \mu\text{m}$  laser is 107 mJ, and the conversion efficiency from 808 nm to  $2.1\ \mu\text{m}$  is 10.5%. The beam quality  $M^2$  factor is  $M_x^2 = 2.38$ ,  $M_y^2 = 1.56$ , respectively.

**Key words** lasers;  $2\ \mu\text{m}$  laser; optical parametric oscillator; KTP crystal

## 1 引 言

$2\ \mu\text{m}$  激光在光通信、医疗诊断、光谱学和环境监测等方面具有广泛的应用前景, 并且是中红外波段( $3 \sim 5\ \mu\text{m}$ )光参量振荡器(OPO)理想的抽运源。通过技术成熟的 1064 nm 激光器抽运非线性晶体的  $2\ \mu\text{m}$  OPO, 由于其可调谐性、全固化、结构紧凑、可实现高功率、高光束质量和长寿命输出等优点而

受到越来越多的关注<sup>[1~7]</sup>。

磷酸氧钛钾(KTiOPO<sub>4</sub>, 简称 KTP)晶体具有非线性光学系数大、热导率高、不易潮解、化学机械性能稳定、硬度高、抗激光损伤阈值高且容易抛光及镀膜等特点, 是 OPO 目前最常用的非线性晶体之一<sup>[8]</sup>。2009 年, 彭跃峰等<sup>[4]</sup>利用声光调 Q, Nd:YAG 激光器抽运内腔两块走离补偿的 KTP OPO,

收稿日期: 2009-12-08; 收到修改稿日期: 2010-01-30

作者简介: 魏星斌(1984—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光二极管抽运固体激光器技术方面的研究。

E-mail: wishingbeing@hotmail.com

导师简介: 陈兴无(1968—), 男, 研究员, 硕士生导师, 主要从事激光器技术方面的研究。E-mail: Chenxw@caep.com.net

在高重复频率  $7.5\ \text{kHz}$  下, 获得了平均功率  $46.5\ \text{W}$  的  $2.128\ \mu\text{m}$  激光输出, 激光二极管 (LD)  $808\ \text{nm}$  到  $2.1\ \mu\text{m}$  的转换效率为  $9.89\%$ , 光束质量因子  $M^2$  小于  $2.8$ 。

本文设计了一台腔内 KTP OPO  $2\ \mu\text{m}$  脉冲激光器。采用电光 (EO) 调 Q, Nd:YAG 激光器输出的  $1064\ \text{nm}$  激光抽运腔内两块走离补偿的 KTP 晶体, 当激光二极管单脉冲能量为  $1.02\ \text{J}$ , 电光 Q 开关频率为  $30\ \text{Hz}$  时, 获得了单脉冲能量  $107\ \text{mJ}$ , 简并波长  $2.1\ \mu\text{m}$  激光输出,  $808\ \text{nm}$  LD 到  $2.1\ \mu\text{m}$  的光-光转换效率为  $10.5\%$ , 光束质量因子分别为  $M_x^2=2.38, M_y^2=1.56$ 。

## 2 实 验

图 1 为电光调 Q, Nd:YAG 激光器输出的 EO  $1064\ \text{nm}$  激光抽运腔内两块走离补偿的 KTP 晶体

双谐振光参量振荡 (DROPO)  $2\ \mu\text{m}$  固体激光器的实验装置图。激光器由 LD 抽运的 Nd:YAG 模块,  $\lambda/4$  波片, 电光 Q 开关, 偏振片, 两块光轴方向相向放置的 KTP 晶体和三块平面腔镜组成。M1 和 M3 构成了  $1064\ \text{nm}$  抽运光的谐振腔, M2 和 M3 构成了 DROPO 的谐振腔。M1 对  $1064\ \text{nm}$  激光的反射率为  $90\%$ , M2 对  $1064\ \text{nm}$  激光的透射率大于  $97\%$ , 对  $2.12\ \mu\text{m}$  激光的反射率大于  $99.5\%$ , M3 对  $1064\ \text{nm}$  激光的反射率大于  $99.5\%$ , 对  $2.12\ \mu\text{m}$  激光的反射率为  $50\%$ 。通过调节 M1 对  $1064\ \text{nm}$  激光的反射率, 可以有效地调节激光器腔内的功率密度。Nd:YAG 抽运模块晶体棒的直径为  $6\ \text{mm}$ , 由中心波长为  $808\ \text{nm}$  的 LD 抽运, 电光 Q 开关重复频率设定为几十赫兹, KTP 晶体的尺寸均为  $8\ \text{mm}\times 8\ \text{mm}\times 15\ \text{mm}$ , 两端面镀有  $1.064\ \mu\text{m}$  和  $1.8\sim 2.3\ \mu\text{m}$  的增透膜, 按  $\varphi=0^\circ, \theta=53^\circ$  切割, 放在水冷的铜夹具上进行冷却, 箭头方向表示光轴方向。

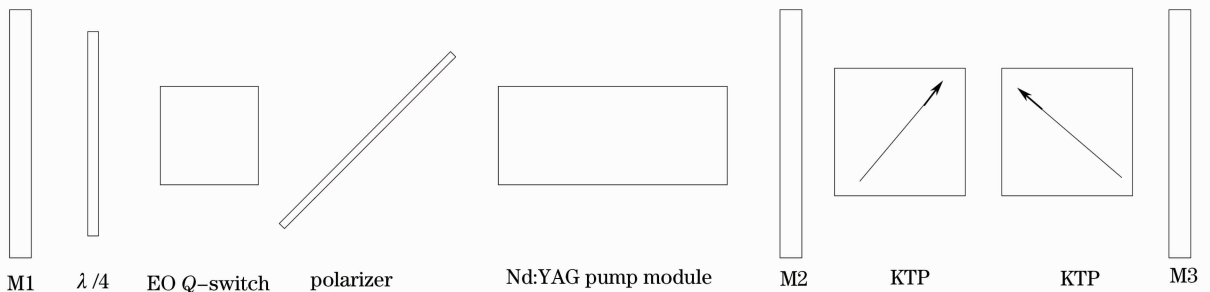


图 1 腔内 KTP OPO  $2\ \mu\text{m}$  固体激光器示意图

Fig. 1 Schematic of intracavity KTP OPO  $2\ \mu\text{m}$  solid-state laser

KTP 晶体属于正交晶系,  $\text{mm}2$  点群, 是光学双轴晶体。在非线性频率转换中, I 类相位匹配相互作用的非线性系数非常小, 没有实际用途。而采用 II 类相位匹配 ( $\text{o}\rightarrow\text{o}+\text{e}$ ), 有效非线性系数较大, 可以获得较高的转换效率。

OPO 需要满足能量守恒和动量守恒方程, 分别对应于抽运光与参量光的波长关系和相位匹配关系。结合 KTP 晶体的折射率方程, 可以得到信号光和闲频光波长随  $\theta$  的调谐曲线。当参量过程在 XZ 平面上进行,  $\varphi=0^\circ, \theta=52.3^\circ$  时, 信号光波长和闲频光波长相交, 对应于简并波长  $2.128\ \mu\text{m}$  激光输出<sup>[1,3]</sup>。

由于在简并输出的情况下, 信号光和闲频光无法分辨, OPO 腔型只能采取 DROPO 结构。DROPO 的阈值比单谐振光参量振荡 (SROPO) 的低很多, 并且降低了对光学元器件抗激光损伤阈值的要求。文献[4]理论计算出了双谐振 KTP OPO 的阈值功率密度, 为激光器的设计提供了重要的参

考依据。根据理论计算的结果, 合理设计腔内功率密度、谐振腔基模体积大小以及 OPO 谐振腔输出镜反射率等, 可以获得高脉冲能量、高光束质量的  $2\ \mu\text{m}$  激光。

在 OPO 过程中, 走离效应影响了光波间的相互作用效率。可以通过两块 KTP 晶体光轴方向相对串接来补偿走离效应带来的不利影响, 同时增加了增益长度, 降低了阈值, 提高了转换效率。还可以将 KTP 晶体置于腔内, 抽运光往返经过 KTP 晶体, 相当于两块光轴方向相向放置的结构, 进行走离补偿。采用腔内 OPO, 降低了起振阈值抽运功率, 可得到比腔外 OPO 更高的转换效率。所以实验装置采用两块 KTP 晶体走离补偿的腔内 DROPO 结构。

由于目前国内  $2\ \mu\text{m}$  镀膜技术的限制, 损伤阈值较低, 而且在实验过程中, 腔内的功率密度较高, 很容易造成光学器件的损伤, 甚至打坏抽运激光器的 Nd:YAG 晶体棒, 为此选择了较大模体积的谐振腔结构。

### 3 实验结果和分析

首先对抽运源开展了实验研究。KTP 晶体不放入腔内,通过 CCD 测量输出的 1064 nm 激光光斑大小,功率计测量输出功率大小,可以估算腔内的功率密度。通过改变腔镜的反射率和腔长,可以有效地调节腔内的功率密度。然后在腔内放入两块走离补偿的 KTP 晶体,按图 1 所示的装置进行了实验研究。由于双谐振腔固有的不稳定性,在调节过程中,激光器十分敏感。通过多次试验,在 EO Q 开关重复频率为 30 Hz,输出腔镜反射率为 50% 时,获得了较稳定的简并波长 2.1  $\mu\text{m}$  激光输出,脉宽约为 30 ns。2.1  $\mu\text{m}$  激光输出单脉冲能量与 808 nm LD 的单脉冲能量关系曲线如图 2 所示。从图中可以看出随着 LD 抽运能量的增加,激光器输出的 2.1  $\mu\text{m}$  激光能量近线性增加,获得了最高 107 mJ 的单脉冲能量,相应的光-光转换效率为 10.5%。

通过精细调节两块 KTP 晶体的角度,可以提高走离补偿的效果,获得完全简并的激光输出。激光器输出光谱如图 3 所示,中心波长为 2.128  $\mu\text{m}$ ,

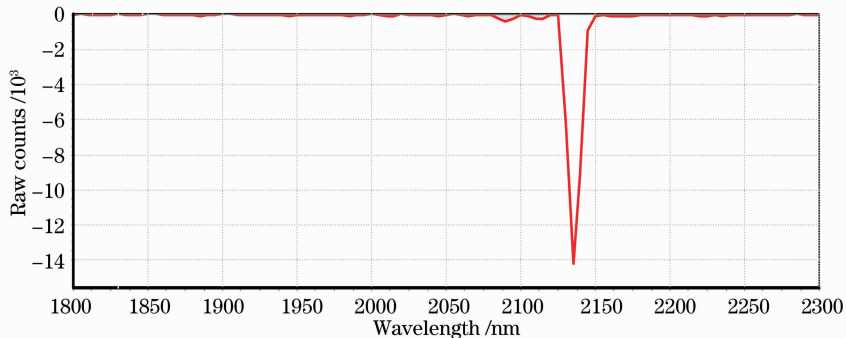


图 3 输出激光光谱

Fig. 3 Spectrum of output laser

通过测量不同位置的输出光斑大小,以及拟合光束传输方程<sup>[4]</sup>,两个方向的光束质量因子分别为  $M_x^2 = 2.38$ ,  $M_y^2 = 1.56$ 。在较低的重叠频率下,KTP OPO 的热效应和热梯度并不显著,通过水冷的铜夹具,可以有效地带走废热,保持 KTP 晶体的温度均匀性,而且 KTP 晶体的折射率对温度的变化并不敏感。在临界相位匹配中 ( $\theta = 53^\circ$ ,  $\varphi = 0^\circ$ ),KTP OPO 的接收角非常小,仅为 2.6 mrad/cm,因此只有发散角小的低阶模才能实现相位匹配,从而可以获得较好的光束质量。适当地增加整个激光器的腔长,可以抑制边缘振荡,从而提高输出的 2.1  $\mu\text{m}$  激光光束质量。

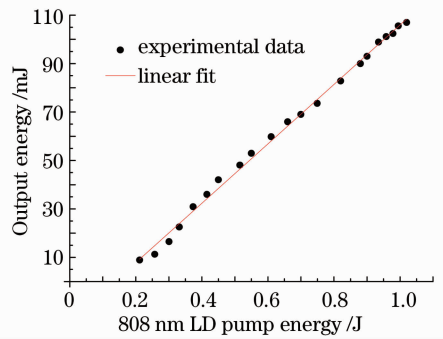
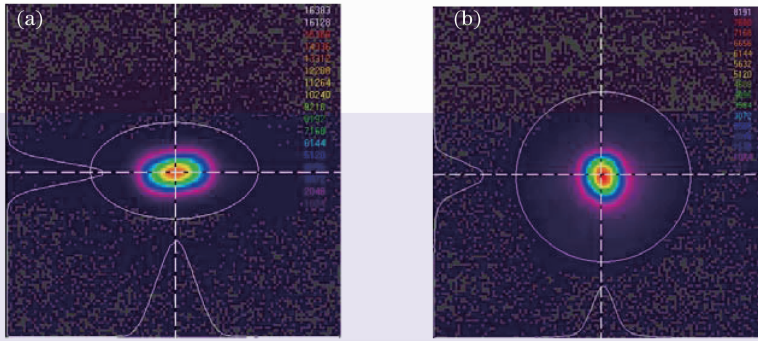


图 2 2.1  $\mu\text{m}$  激光单脉冲能量与 LD 抽运单脉冲能量的关系曲线

Fig. 2 2.1  $\mu\text{m}$  laser output energy versus LD pump energy

符合 KTP 的角度调谐原理。由于光谱仪测量精度的原因,实际线宽比图 3 所示的要窄。采用 II 类相位匹配,参量光分别是 o 光和 e 光,即便在波长相近的简并点附近,两者的折射率仍存在差别,这比 I 类相位匹配,参量光同为 o 光或 e 光的 OPO 的线宽窄很多<sup>[9]</sup>。

图 4 为 2.1  $\mu\text{m}$  激光的近场光斑分布,图 4(a) 是脉冲能量为 107 mJ 时的光斑分布,图 4(b) 是较低能量下的光斑分布。从图中可以看出较低脉冲能量的 2.1  $\mu\text{m}$  激光呈圆形光斑,随着能量的提升畸变为椭圆光斑。这是由于 KTP OPO 在水平面和垂直面上的接收角不同造成的。在垂直面上的接收角有限,限制了具有增益的离轴波矢,在 OPO 谐振腔内的参量光往返振荡放大过程中,光束在垂直方向被压缩。而在水平面上的接收角较大,发散角限制要求小,光束质量比垂直面上的差<sup>[10]</sup>。而对于能量较低的情况,只有发散角很小而功率密度较高的低阶模能实现相位匹配,因此呈现为圆形光斑,光束质量较好。

图 4  $2\ \mu\text{m}$  激光的近场光斑分布Fig. 4 Near field intensity distribution of  $2\ \mu\text{m}$  laser

## 4 结 论

设计了一台高单脉冲能量的 OPO  $2\ \mu\text{m}$  固体激光器。通过 EO 调 Q, Nd:YAG 激光器输出的  $1064\ \text{nm}$  激光抽运腔内两块走离补偿的 KTP 晶体, 采用 DROPO 结构, 获得  $2\ \mu\text{m}$  激光输出。当 LD 单脉冲能量为  $1.02\ \text{J}$ , EO Q 开关频率为  $30\ \text{Hz}$  时, KTP OPO 输出的  $2.1\ \mu\text{m}$  激光单脉冲能量为  $107\ \text{mJ}$ 。LD  $808\ \text{nm}$  到  $2.1\ \mu\text{m}$  的光-光转换效率为  $10.5\%$ , 光束质量因子分别为  $M_x^2 = 2.38$ ,  $M_y^2 = 1.56$ 。 $2.1\ \mu\text{m}$  激光单脉冲能量的进一步提高主要受限于光学元器件的损伤。随着中红外波段镀膜技术的提高和系统的优化设计, 可以进一步提高转换效率和单脉冲能量以及整个激光器的稳定性。 $2\ \mu\text{m}$  激光作为抽运光, 通过 OPO 技术, 可以获得高效率的中红外激光 ( $3\sim 5\ \mu\text{m}$ ) 输出。

## 参 考 文 献

- Zhu Haiyong, Zhang Ge, Lin Yanfeng *et al.*. Intracavity OPO pulsed  $2\ \mu\text{m}$  laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(s3): 54~57  
朱海永, 张戈, 林燕凤等. 腔内 OPO  $2\ \mu\text{m}$  脉冲激光器[J]. 红外与激光工程, 2008, **37**(s3): 54~57
- Lu Yanhua, Wang Weimin, Peng Yuefeng *et al.*. Intracavity KTP doubly resonant optical parametric oscillator pumped by Nd:YAG laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(Suppl.): 189~191  
鲁燕华, 王卫民, 彭跃峰等. 内腔式 Nd:YAG 激光抽运 KTP 双谐振光参量振荡器[J]. 中国激光, 2006, **33**(Suppl.): 189~191
- Xie Gang, Peng Yuefeng, Lu Yanhua *et al.*. High efficiency  $23.6\ \text{W}$ ,  $2\ \mu\text{m}$  laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(11):

1488~1491

- 谢刚, 彭跃峰, 鲁燕华等.  $23.6\ \text{W}$  高效率  $2\ \mu\text{m}$  激光器[J]. 中国激光, 2007, **34**(11): 1488~1491
- Peng Yuefeng, Xie Gang, Wang Weimin *et al.*. Intracavity optical parametric oscillator high-repetition-rate  $2\ \mu\text{m}$  laser with  $46\ \text{W}$  output power[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 33~36  
彭跃峰, 谢刚, 王卫民等.  $46\ \text{W}$  腔内光参量振荡高重复频率  $2\ \mu\text{m}$  激光器[J]. 中国激光, 2009, **36**(1): 33~36
- He Jingliang, Wang Ruihua, Huang Haitao *et al.*. Efficiency and high power all-solid-state  $1.5\ \mu\text{m}$  intracavity optical parametric oscillator[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1789~1792  
何京良, 王瑞华, 黄海涛等. 高效大功率全固态  $1.5\ \mu\text{m}$  腔内光参量振荡器[J]. 中国激光, 2009, **36**(7): 1789~1792
- Qianjin Cui, Nan Zong, Yiting Xu *et al.*.  $2\text{-}\mu\text{m}$  singly resonant optical parameter oscillator[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(6): 519~520
- Liu Xu, Lu Changyong, Cheng Yong *et al.*. Laser diode pumped optical parametric oscillator laser with orthogonal porro-prism resonator[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(9): 2257~2261  
刘旭, 卢常勇, 程勇等. 激光二极管抽运正交波罗棱镜腔光学参量振荡激光器[J]. 中国激光, 2009, **36**(9): 2257~2261
- Shen Dezhong, Chen Jianrong. Overview on the development and market of KTP crystal product [J]. *Advanced Materials Industry*, 2007, (10): 66~71  
沈德忠, 陈建荣. KTP 晶体与器件的研究进展及市场展望[J]. 新材料产业, 2007, (10): 66~71
- Yao Baoquan, Wang Yuezhu, Wang Qi. KTP optical parametric oscillator with a non-resonant configuration [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(8): 967~971  
姚宝权, 王月珠, 王骐. 非谐振腔型 KTP 光参变振荡器[J]. 光学学报, 2002, **22**(8): 967~971
- Wang Yuezhu, Yao Baoquan, Wang Qi. KTP optical parametric oscillator with both critically and non-critically phase-matching [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(10): 1368~1373  
王月珠, 姚宝权, 王骐. 临界和非临界相位匹配 KTP 光学参量振荡器[J]. 光学学报, 2000, **20**(10): 1368~1373