

高功率腔内双共振 $2\ \mu\text{m}$ 光参量振荡器特性研究

崔前进^{1)†} 徐一汀^{1)‡} 宗楠^{1)‡} 鲁远甫^{1)‡} 程贤坤^{1)‡} 彭钦军¹⁾
薄勇¹⁾ 崔大复¹⁾ 许祖彦¹⁾

1) 中国科学院物理研究所, 北京凝聚态物理国家实验室, 北京 100190)

2) 中国科学院研究生院, 北京 100190)

(2008 年 8 月 29 日收到, 2008 年 9 月 7 日收到修改稿)

报道了一种稳定的高功率双共振 $2\ \mu\text{m}$ 光参量振荡器(OPO). 该 OPO 使用调 Q 的线偏振全固态 Nd:YAG 激光器作为抽运源, 利用双棒串接补偿热致双折射和双 Q 开关正交放置技术提高了抽运源的输出功率和光束质量, 通过腔内抽运单块 KTP 晶体实现了稳定的高功率 $2\ \mu\text{m}$ 激光输出. 在调 Q 频率为 5 kHz 时, 得到了 29.5 W 的 $2\ \mu\text{m}$ 激光输出. 研究了 OPO 输出功率同 KTP 晶体温度和声光 Q 调制频率的关系, 并测量了在 29W 时 $2\ \mu\text{m}$ 激光的功率稳定性. 在 1 h 内该 OPO 的功率起伏小于 1.4%.

关键词: 光参量振荡器, $2\ \mu\text{m}$ 激光器, KTP 晶体, 双共振

PACC: 4260B, 4260D, 4265K

1. 引言

$2\ \mu\text{m}$ 激光在医疗以及遥感等方面有重要应用价值, 关于 $2\ \mu\text{m}$ 激光的产生也成为人们的研究热点. 特别是在激光医疗方面, $2\ \mu\text{m}$ 波段处于水的吸收峰, 很适合用于激光手术. 目前产生 $2\ \mu\text{m}$ 激光的方法主要有两种. 一是用半导体激光二极管抽运 Tm:YAG 等激光晶体直接产生 $2\ \mu\text{m}$ 激光, 此种方法有一个很大缺点就是激光晶体必须在低温下工作^[1-3]. 另一种是利用 $1\ \mu\text{m}$ 激光作为抽运源, 对 KTP 或者 PPKTP 晶体进行 OPO 得到 $2\ \mu\text{m}$ 激光. 目前仅有少数关于利用 OPO 产生 $2\ \mu\text{m}$ 激光的研究报道. 2000 年, Wu 等人报道了利用 Nd:YALO 激光器产生的偏振光(光束质量 $M^2 \approx 18$)抽运两块 KTP 晶体进行 OPO 产生 21 W 的 $2\ \mu\text{m}$ 激光^[4]. 谢刚等也报道了使用 Nd:YAG 产生的 $1.06\ \mu\text{m}$ 激光通过 OPO 产生 23.6 W $2\ \mu\text{m}$ 激光^[5]. 他们都使用了两块走离补偿放置的 KTP 晶体. 但是利用线偏振 Nd:YAG 激光器对单块 KTP 晶体进行 OPO 产生稳定的高功率 $2\ \mu\text{m}$ 激光很少被报道.

本文通过使用调 Q 的线偏振全固态 Nd:YAG 激光器作为抽运源, 通过腔内抽运单块 KTP 晶体实

现了稳定的 29 W 的 $2\ \mu\text{m}$ 激光输出, 这也是利用单块 KTP 晶体获得的最高功率输出. 当输出功率为 29 W 时, 在一个小时内的功率起伏小于 1.4%. 为了得到稳定的高功率 $2\ \mu\text{m}$ 激光输出, 我们采用了以下技术手段: 一是使用双棒串接补偿热致双折射和双 Q 开关正交放置技术提高了抽运源的输出功率和光束质量, 二是在 Nd:YAG 激光器内放置偏振片得到高功率 $1.06\ \mu\text{m}$ 偏振光以提高 OPO 输出功率的稳定性.

2. 实验装置及分析

图 1 显示了双共振 OPO 的实验示意图. 其中, Nd:YAG 激光器由两个相同的抽运模块, 两个正交放置的声光 Q 开关, 一块旋光晶体以及两个平面腔镜 M_1, M_3 和一个薄膜偏振片组成. 抽运模块采用五维 LD 侧面对称抽运结构^[6]. 考虑到激光晶体的热透镜效应, $1.06\ \mu\text{m}$ 激光在 Nd:YAG 棒的端面的光斑较大, 因此, 为了完全关断激光抽运增益而不至于对声光 Q 开关造成损伤, 两个 Q 开关尽可能地靠近抽运模块放置^[7]. 在侧面抽运结构中, 由热应力产生的热致双折射可以通过如图 1 所示利用 90° 旋光晶体加以补偿^[8]. 平面镜 M_1 表面镀有 $1.06\ \mu\text{m}$ 高

† E-mail: c. qj@163.com

反膜和 $2\ \mu\text{m}$ 部分反射膜,平面镜 M_3 镀有 $1.06\ \mu\text{m}$ 的高反膜. 为了降低因加入偏振片而引起的像差,在实验中我们利用了偏振片的反射面,使得 s 偏振光起振. 通过实验对比了 p 光和 s 光起振对 1.06

μm 输出功率的影响,发现 s 光起振更容易获得高功率的 $1.06\ \mu\text{m}$ 激光输出. OPO 的谐振腔由平面镜 M_1, M_2 组成. 其中 M_2 镀有 $1.06\ \mu\text{m}$ 高透和 $2\ \mu\text{m}$ 高反膜.

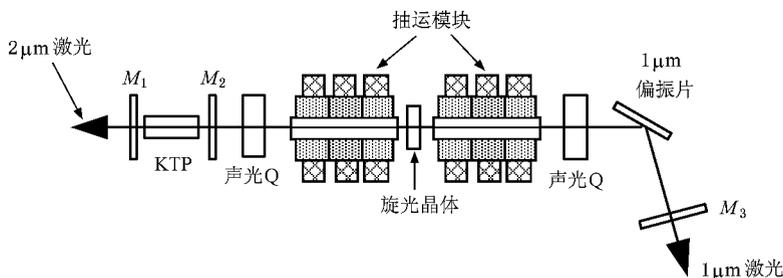


图 1 双共振 $2\ \mu\text{m}$ OPO 实验装置示意图

选用一块 II 类相位匹配的 KTP 晶体作为非线性晶体放置在 Nd:YAG 激光器的谐振腔内. KTP 晶体在 $0.5\text{--}2.8\ \mu\text{m}$ 波段有很高的透射率,其有效非线性系数和抗损伤阈值都很大,因此,很适合作为产生 $2\ \mu\text{m}$ 激光的晶体. 图 2 显示了在 100°C , $\varphi = 0^\circ$ 时 KTP 晶体随 θ 角的调谐曲线. 图中两条曲线相交处为 KTP 晶体的简并点. 在我们的实验中, OPO 工作在 KTP 晶体的简并点,这样既可以产生高功率的 $2\ \mu\text{m}$ 激光,又减轻了镀膜的压力. 对 KTP 而言, I 类相位匹配时,晶体的非线性系数非常低,因此我们利用其 II 类相位匹配. KTP 的工作温度被设定在约 100°C ,晶体的切割面为 XZ 面(沿此面 KTP 的有效非线性系数最大),对应的切割角 $\theta = 51.7^\circ$, $\varphi = 0^\circ$. 在这种切割方式下, $2.128(e)\ \mu\text{m}$ 光存在约 $46\ \text{mrad}$ 的走离角,在没有进行走离补偿的情况下,使用单块 KTP 晶体的长度就受到了限制.

为了使 $1.06\ \mu\text{m}$ 激光在保持高的功率输出的同时,具有好的光束质量和较长的瑞利长度,我们优化了 $1.06\ \mu\text{m}$ 激光器的腔结构. 如图 1 所示, $1.06\ \mu\text{m}$ 激光器的谐振腔采用对称结构,腔长接近 $1000\ \text{mm}$. OPO 的腔长约为 $50\ \text{mm}$. 对于经过优化的谐振腔,我们利用光束质量分析仪 ($M^2\text{-}200$ Spiricon Inc.) 测量了 $1.06\ \mu\text{m}$ 基频光的光束质量因子 M^2 ,结果显示 $1.06\ \mu\text{m}$ 激光的光束质量 $M^2 < 10$,瑞利长度在 $600\ \text{W}$ 以内的抽运功率范围内保持在 $450\ \text{mm}$ 以上. OPO 腔同样采用平行平面腔结构是基于两点考虑:一是系统中只有平面镜,这样调节腔镜 M_2 时,不会使 $1.06\ \mu\text{m}$ 激光发生失谐;二是,虽然平行平面腔是非稳腔,但由于 KTP 晶体吸收了部分 $1.06\ \mu\text{m}$ 激光,使 KTP 晶体产生了热透镜,从而使得 OPO 腔变为稳定腔^[9].

3. 实验结果及分析

为了确定 OPO 运转时,声光 Q 的最佳调制频率,首先在 LD 抽运功率为 $420\ \text{W}$ 时,测量了 $2\ \mu\text{m}$ 输出功率随声光 Q 调制频率的变化关系. 在功率计前面放置滤光片可以有效避免 $1.06\ \mu\text{m}$ 激光及其倍频光对测量 OPO 输出功率的影响,该滤光片表面镀有 $1.06\ \mu\text{m}$ 和 $0.532\ \mu\text{m}$ 的高反膜和 $2\ \mu\text{m}$ 高透膜. 实验中 $2\ \mu\text{m}$ 输出镜的透过率为 20% . 从图 3 可以看出在调 Q 频率从 $3\ \text{kHz}$ 到 $6\ \text{kHz}$ 变化过程中 $2\ \mu\text{m}$ 的输出功率先增加,然后降低,在 $5\ \text{kHz}$ 左右达到最大值. 这主要是因为,在 $5\ \text{kHz}$ 时, $1.06\ \mu\text{m}$ 的峰值功率最高且平均功率没有明显降低. 因此,在后面的实

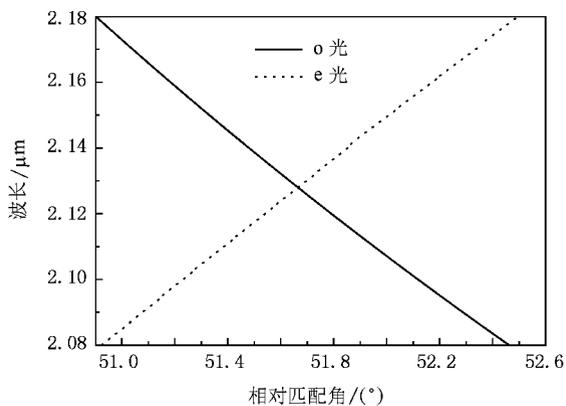


图 2 KTP 晶体的角度调谐曲线

验中声光 Q 的调制频率都设定在 5 kHz.

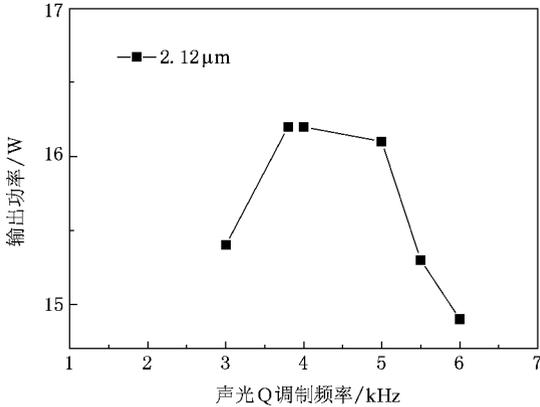


图 3 OPO 输出功率与声光 Q 调制频率的关系

图 4 给出了 OPO 在不同的输出耦合率下的功率输出曲线. 从图中明显可以看出, 当 $2\ \mu\text{m}$ 输出耦合率不断增加时, OPO 的最高输出功率先增加后减小. 在 $R = 50\%$ 时达到约 29.5 W 的最大值.

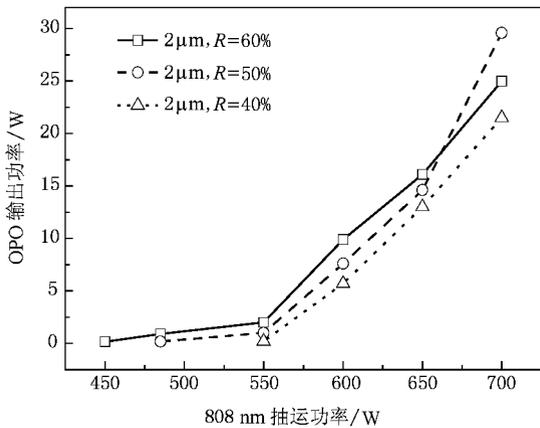


图 4 OPO 输出功率特性曲线

KTP 晶体的非线性系数对温度不敏感, 当温度变化时, KTP 晶体的匹配角变化很小, 可以预期 $2\ \mu\text{m}$ 的输出功率不会随温度有大的波动. 图 5 显示了 LD 抽运功率约为 650 W 时 OPO 的温度特性. 从图中可以看出在大约 $20\ ^\circ\text{C}$ 的温度范围内, $2\ \mu\text{m}$ 功率的上下浮动最大只有 0.5 W, 这就从实验上证实了利用 KTP 晶体进行的 OPO 时, 对晶体的温度控制精度要求并不严格.

图 6 显示了 OPO 输出功率的稳定性, 观察时间为 1 h. $2\ \mu\text{m}$ 的平均输出功率约为 29 W. 从图中可以看出经过长时间的运转, 该 OPO 系统仍能保持稳

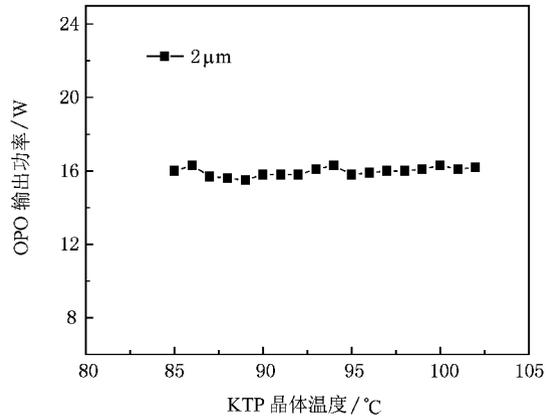


图 5 OPO 输出功率同 KTP 晶体温度的关系

定的功率输出, 起伏小于 1.4%. 这表明利用双共振 OPO 产生的 $2\ \mu\text{m}$ 激光源在对功率稳定要求高的领域具有很好的应用前景.

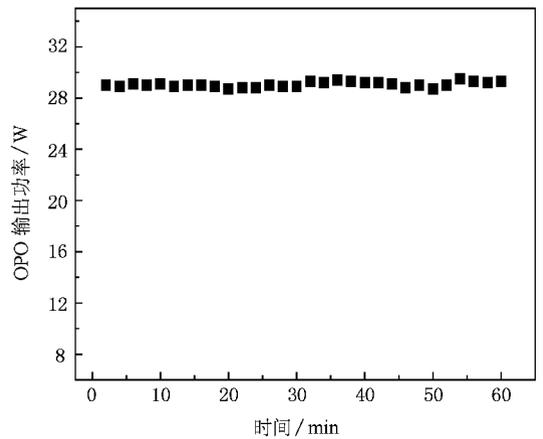


图 6 OPO 输出功率的稳定性曲线

4. 结 论

本文利用调 Q 的线偏振全固态 Nd:YAG 激光器作为抽运源, 利用双棒串接补偿热致双折射和双 Q 开关正交放置技术提高了抽运源的输出功率和光束质量, 通过腔内抽运单块 KTP 晶体实现了稳定的高功率 $2\ \mu\text{m}$ 激光输出. 在调 Q 频率为 5 kHz 时, 获得了 29.5 W 的 $2\ \mu\text{m}$ 激光输出. 对 OPO 的输出功率同 KTP 晶体温度和声光 Q 调制频率的关系进行了研究, 实验结果表明, 当晶体的工作温度浮动 $\pm 8\ ^\circ\text{C}$ 时, 其输出功率变化很小. 通过进一步提高抽运功率, 有望提高 OPO 的输出功率.

- [1] Lai K S , Phua P B , Wu Y L , Lim *et al* 2000 *Opt. Lett.* **25** 591
- [2] Honea E C , Beach R J , Sutton S B *et al* 1997 *IEEE J. Quantum Electron* **33** 1592
- [3] Yu J , Trieu B C , Modlin E A *et al* 2006 *Opt. Lett.* **31** 462
- [4] Wu R F , Phua P B , Lai K S *et al* 2000 *Opt. Lett.* **25** 1460
- [5] Xie G , Peng Y F , Lu Y H *et al* 2007 *Chinese J. Lasers* **34** 1487 (in Chinese) [谢 刚、彭跃峰、鲁艳华等 2007 中国激光 **34** 1487]
- [6] Sun Z P , Li R N , Bi Y *et al* 2005 *Chin. Phys. Lett.* **22** 339
- [7] Driedger K P , Ifflander R M , Weber H *et al* 1988 *IEEE J. Quantum Electron* **24** 665
- [8] Bo Y , Geng A C , Bi Y *et al* 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1171 (in Chinese) [薄 勇、耿爱丛、毕 勇等 2006 物理学报 **55** 1171]
- [9] Tetsuo Kojima , Shuichi Fujikawa , Koji Yasui 1999 *IEEE J. Quantum Electron* **35** 377

High power 2- μm intracavity doubly resonant optical parametric oscillator

Cui Qian-Jin^{1,2)†} Xu Yi-Ting^{1,2)} Zong Nan^{1,2)} Lu Yuan-Fu^{1,2)} Cheng Xian-Kun^{1,2)}
Peng Qin-Jun¹⁾ Bo Yong¹⁾ Cui Da-Fu¹⁾ Xu Zu-Yan¹⁾

1 \times Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics , Institute of Physics , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100190 , China)

2 \times Graduate School of the Chinese Academy of Sciences , Beijing 100190 , China)

(Received 29 August 2008 ; revised manuscript received 7 September 2008)

Abstract

A high power intracavity optical parametric oscillator (OPO) with a type II KTiOPO_4 (KTP) is reported. The OPO is placed in a high power , linearly polarized diode-side-pumped Nd:YAG laser cavity. By a suitable design of the OPO cavity , a maximum of 29.5 W at 2 μm is reached with repetition rate of 5 kHz. The output power characteristic of OPO is investigated. The fluctuation of OPO output power is less than 1.4% .

Keywords : OPO , 2 μm laser , KTP crystal , DRO

PACC : 4260B , 4260D , 4265K