

# 内腔单共振光学参量振荡器和 光学参量放大器运转特性的研究\*

柳 强 鞠有伦 姚宝权 王月珠 王 骥

(可调谐激光技术国家级重点实验室, 哈尔滨工业大学光电子技术研究所 哈尔滨 150001)

**提要** 报道了在重复频率调  $Q$  Nd:YAG 激光腔内, 实现内腔光参量振荡器(IOPO)和光参量放大器(IOPA)的稳定运转, IOPO 参量振荡阈值小于 20 mJ, 获得最大输出能量为 35.9 mJ, 相应的转换效率为 45%, 中心输出波长为 1.57  $\mu\text{m}$ 。该装置结构紧凑, 易于小型化、全固化。

**关键词** IOPO, KTP, 非临界相位匹配

## 1 引 言

光学参量振荡器(OPO)自 1965 年首先在脉冲激光器上实现<sup>[1]</sup>以来, 人们对 OPO 进行了广泛的研究, 并取得了长足的进展, 已从脉冲、连续发展到锁模运转, 泵浦源已遍及固体、气体、染料、准分子等激光器, 激光泵浦脉冲宽度也已从连续到几百纳秒、几个纳秒甚至到皮秒、飞秒量级, 这其中大多集中于外腔, 即通常所说的 OPO。但早在 70 年代初 Smith, Parker 和 Ammann, Falk<sup>[2,3]</sup>等就分别对连续泵浦和脉冲泵浦的内腔光参量振荡器(IOPO)进行了理论和实验报道, 最近也有一些关于 IOPO<sup>[4,5]</sup>的研究, 他们所用的泵浦能量及获得的参振激光输出能量都比较小。本文所述的是在氙灯泵浦的重复频率为 1 Hz, 调  $Q$  脉宽为 13 ns 的 Nd:YAG 激光腔内, 大能量泵浦  $x$  轴切割( $\theta = 90^\circ, \varphi = 0^\circ$ )非临界相位匹配的单共振 KTP 光参量振荡器, 参量振荡阈值小于 20 mJ, 输出能量从 2 mJ 到 35.9 mJ, 转换效率从 10% 到 45%, 中心波长为 1.57  $\mu\text{m}$ 。同时对内腔光参量放大器(IOPA)也进行了初步探讨, 获得了比较好的实验结果。

## 2 IOPO 的几点考虑

OPO 能够稳定运转与泵浦光的功率密度有相当大的关系。对外腔 OPO, 为提高泵浦光的功率密度, 以达到 OPO 的振荡阈值, 增大参振能量输出, 提高转换效率, 常见的办法是将泵浦光通过长焦距透镜聚焦或进行缩束, 光学系统较为复杂, 且对光学镀膜和非线性晶体损伤的危险性较大。普通激光器腔内的功率密度与腔外的功率密度的比值为  $1/(1-R)$  ( $R$  为输出腔镜的反射率), 相应地提高  $R$ , 腔内的功率密度会变得很高, 为 OPO 稳定运转提供了强有力的条件。同时作为内腔 OPO 由于泵浦光往返经过参振晶体, 补偿了泵浦光在晶体中的走离效应,

\* 国家自然科学基金资助项目(批准号 69778006)。

收稿日期: 1998-05-12; 收到修改稿日期: 1998-07-03

这与外腔用切割相同的两块晶体相向放置的补偿效果完全相同,另外由于 IOPO 循环泵浦参振晶体,且为有源的,泵浦光转换为参振光后损耗会很快得到补充,理论上应该获得较高的转换效率,这与外腔 OPO 的环型腔结构相类似,所不同的是在环型腔结构中泵浦光经参振晶体转换为参振光损耗后,下次泵浦的能量就要相应地减少。IOPO 结构比较紧凑,易于小型化、全固化,所以对其进行必要的理论和实验研究是非常有意义的。

### 3 实验装置

图 1 为 IOPO 的实验装置图,  $M_1, M_2$  构成 YAG 谐振腔,  $M_3, M_4$  构成 OPO 谐振腔,  $M_3$  对  $1.06 \mu\text{m}$  的透射率  $T = 89.6\%$ , 对  $1.57 \mu\text{m}$  的反射率  $R = 99.9\%$ ,  $M_4$  对  $1.06 \mu\text{m}$  的透射率  $T = 98.8\%$ , 对  $1.57 \mu\text{m}$  的反射率  $R = 83.9\%$ 。YAG 谐振腔与 OPO 谐振腔都采用平行平面腔,它们之间保持一个小的夹角,避免因腔片重合而引起干涉。 $M_5$  为输出镜,  $M_6$  为滤光片,所有腔片的基片均为 K9 玻璃,各镜的透过率曲线如图 2 所示。YAG 激

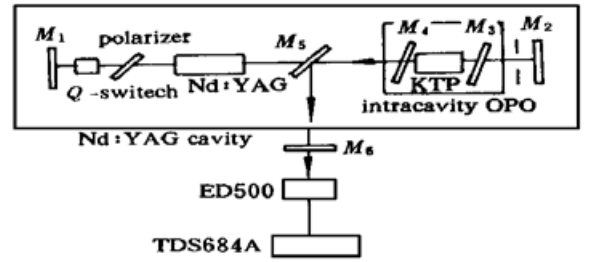


图 1 IOPO 实验装置图

Fig. 1 Experimental setup of the internal optical parametric oscillator

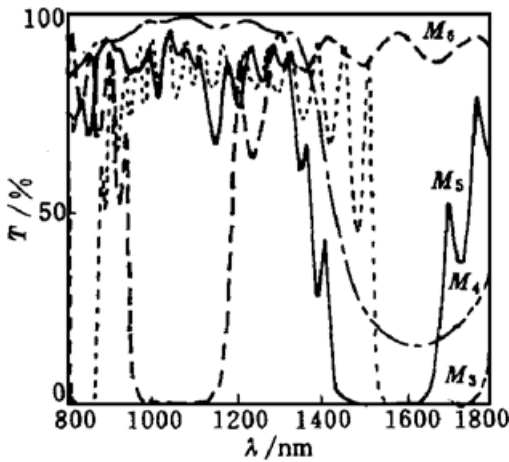


图 2 腔镜的透过率曲线

Fig. 2 Transmission curves of mirrors  $M_3, M_4, M_5,$  and  $M_6$

光器的腔长为  $550 \text{ mm}$ , 激光棒的尺寸为  $\phi 6 \text{ mm} \times 90 \text{ mm}$ , OPO 的腔长为  $25 \text{ mm}$ 。KTP 晶体的大小为  $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ , 两面镀有宽带的增透膜, 切割方式为  $x$  轴切割, 二类匹配单共振, 角度调谐, 信号光中心输出波长为  $1.57 \mu\text{m}$ , 相应闲频光波长为  $3.2 \mu\text{m}$ 。这种切割方式保证了 KTP 晶体有效非线性系数  $d_{\text{eff}}$  最大, 从而使 OPO 运转于较低的阈值, 获得较高的转换效率, 但同时带来的问题是这种非临界相位匹配的方式使 KTP-OPO 的调谐范围较窄, 理论计算为  $1.57 \sim 1.60 \mu\text{m}$ , 实验中没有测其调谐曲线。如将图中的  $M_4$  去掉就构成内腔 OPA, 实质上泵浦光正向泵浦 KTP 时相当于参量发生器(OPG), 产生的信号光经  $M_3$  反射, 泵浦光由  $M_2$  反射反向再次通过 KTP 晶体, 信号光得到放大后由  $M_6$  输出, 相当于 OPG-OPA 系统, 同样具有补偿走离角、增加

参量输出的作用。

### 4 实验结果与讨论

描述光学参量振荡器的三波相互作用耦合波方程为

$$\frac{dA_p}{dz} = iB_p A_s A_i \exp(i(\Delta kz + \varphi))$$

$$\frac{dA_s^*}{dz} = -iB_s A_p^* A_i \exp(i(\Delta kz + \varphi))$$

$$\frac{dA_i}{dz} = iB_i A_p A_s^* \exp[-i(\Delta kz + \Phi)] \tag{1}$$

式中,  $B_n = \frac{\omega_n}{2n_n c} \chi_{eff}$ ,  $\Delta k = K_s + K_i - K_p$ ,  $\Phi = \Phi_s + \Phi_i - \Phi_p$ ,  $n = s, i, p$ 。

根据边界条件, 对于小信号增益和泵浦场衰减很小以及单共振的情况, 联立方程可求出稳态解, 进而得到光参量振荡的增益及转换效率

$$G_s = 1 + \frac{\Gamma_0^2}{\Gamma^2} \text{sh}^2 \Gamma L \tag{2}$$

其中,  $\Gamma^2 = \Gamma_0^2 - (\Delta k/2)^2$ ,  $\Gamma_0^2 = B_s B_i |A_p|^2$ ,  $L$  为非线性晶体的长度

$$\eta = \sin^2 \left[ \frac{L \Delta k}{2} \right] \left[ 1 - \frac{1}{N} \right] \tag{3}$$

$N$  为泵浦功率超阈值倍数。由(2), (3) 式可知信号光的增益与泵浦功率成正比, 转换效率与泵浦功率超阈值倍数成正比,  $N$  越大,  $\eta$  越大, 当  $N = 5$  时,  $\eta$  有饱和的趋势, 图 3(a) 给出了 IOPO 的输出能量、转换效率与泵浦能量的关系曲线(▲代表 IOPO 的输出能量, ●代表相应的转换效率), 当泵浦能量增加时, 输出能量和转换效率都在增加, 当  $N \approx 4$  时转换效率有饱和的趋

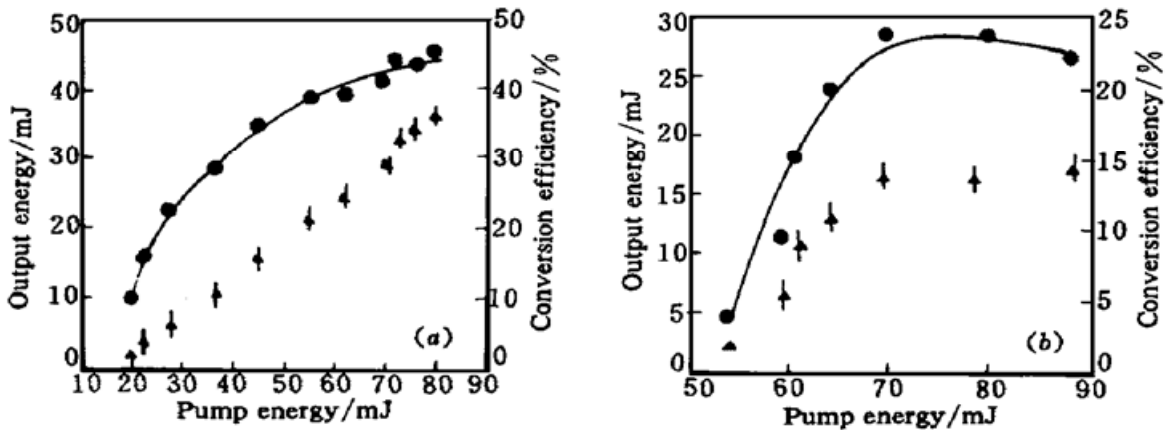


图 3 输出能量、转换效率与泵浦能量的关系曲线

Fig. 3 Output energy and conversion efficiency versus pump energy

(a) IOPO; (b) IOPA

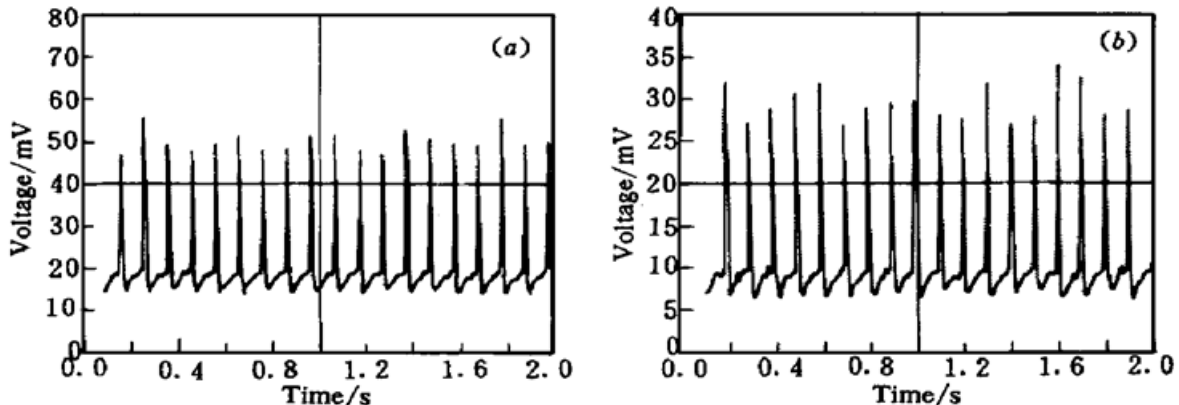


图 4 输出能量采样

Fig. 4 The sample of energy output

(a) IOPO; (b) IOPA

势,与公式(2),(3)描述的趋势基本一致。图3(b)为 IOPO 的特性曲线,与 IOPO 的趋势相同,但随着泵浦能量的增加,参量输出增加得很快,泵浦能量超过一定值时转换效率有所下降。图4为腔内能量为 65 mJ 时参量输出能量的取样图(ED-500 型能量计配合示波器测得),从图中可以看出 IOPO 输出能量的稳定度(优于 5%)明显比 IOPA 输出能量的稳定度(约为 15%左右)高,在阈值附近稳定度相对较差,随着泵浦能量的增加稳定度变好,当泵浦能量增加到一定值时,稳定度开始下降,估计是由已接近晶体的损伤阈值造成的。分析影响参量输出能量稳定度的主要因素为:泵浦能量的不稳定、 $Q$  开关驱动功率不稳定、晶体温升、机械震动等原因。

## 5 结 论

本文通过 IOPO 的实验研究,实现了 IOPO 的低阈值运转,较大能量、较高效率输出。现在一个重要的问题就是由于将 OPO 置入腔内,而 OPO 的谐振腔镜和参振晶体都属于像差元件,它们的光学均匀性直接影响泵浦光的光强分布和相位,而泵浦光的光束质量在很大程度上决定了 OPO 的输出状况,所以进一步的工作是对泵浦光和 OPO 腔结构进行优化,尝试用 SBS 相位共轭镜来补偿 OPO 放入腔内引起的相位畸变,提高泵浦光的光束质量,以实现 IOPO 能更好、更稳定的运转。

## 参 考 文 献

- 1 S. E. Harris. Tunable optical parametric oscillator. *Proc. IEEE*, 1969, **57**(12): 2096~ 2013
- 2 E. O. Ammann, J. M. Yarborough, M. K. Oshman *et al.*. Efficient internal optical parametric oscillator. *Appl. Phys. Lett.*, 1970, **16**(8): 309~ 312
- 3 J. Falk, J. M. Yarborough, E. O. Ammann. Internal optical parametric oscillator. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1971, **QE-7**(7): 359~ 368
- 4 U. J. Greiner, H. H. Klingenberg. Picosecond intracavity optical parametric oscillator. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(1): 43~ 45
- 5 R. Lavi, A. Englander, R. Lallouz. Highly efficient low-threshold tunable all-solid-state intracavity optical parametric oscillator. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(11): 300~ 302

## Research of Properties of an Internal Optical Parametric Oscillator (IOPO) and Optical Parametric Amplifier (IOPA)

Liu Qiang Ju Youlun Yao Baoquan Wang Yuezhu Wang Qi  
(National Key Lab. of Tunable Laser Technology, Institute of Opto-electronics,  
Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

**Abstract** In the cavity of a repetition rate  $Q$ -switched YAG laser, the stable internal optical parametric oscillator (IOPO) and the internal parametric amplifier (IOPA) are realized. The main results are as follows: the threshold of IOPO is smaller than 20 mJ, the maximum output energy is 35.9 mJ, the corresponding conversion efficient is 45%, and the peak output wavelength is 1570 nm. The solid-state instrument is compact and easy to miniaturize.

**Key words** IOPO, KTP, noncritical phase-match