

文章编号: 0258-7025(2006)10-1301-04

信号光脉冲比抽运光窄 12 倍的内腔式 KTP 光参量振荡器

王加贤, 张凤娟, 庄鑫巍

(华侨大学信息科学与工程学院, 福建 泉州 362021)

摘要 在闪光灯抽运的非稳腔 Nd:YAG 被动调 Q 激光器腔内, 放置非临界相位匹配 KTP 晶体, 构成内腔式单谐振 KTP 光参量振荡器(OPO)。研究了输出信号光的波长调谐性能, 获得 1.57~1.60 μm 可调谐激光脉冲。实验结果表明, 1.57 μm 信号光的输出能量随着光参量振荡器腔长的增加而减少, 脉冲宽度随着腔长的增加而有所变化; 抽运能量较大时, 转换效率随着抽运能量的增加趋于饱和然后逐渐下降; 对此给予了合理的理论解释。当光参量振荡器的腔长为 5 cm, 1.06 μm 抽运光脉冲宽度为 30 ns 时, 输出的 1.57 μm 信号光的脉冲宽度为 2.5 ns, 能量为 21.3 mJ。1.57 μm 信号光的脉冲宽度仅为 1.06 μm 抽运光脉冲的 1/12, 总的电光能量转换效率为 0.128%。

关键词 激光技术; 光参量振荡器; KTP 晶体; 脉冲宽度; 信号光脉冲

中图分类号 TN 248.1 文献标识码 A

Intracavity KTP Optical Parametric Oscillator with Signal Pulse Shorter 12 Times than Pump Pulse

WANG Jia-xian, ZHANG Feng-juan, ZHUANG Xin-wei

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Quanzhou, Fujian 362021, China)

Abstract A single resonant intracavity KTP optical parametric oscillator (OPO) is constituted by placing a non-critical phase-matched KTP crystal in a flashlamp pumped and passive Q-switched Nd:YAG laser with an unstable resonator. The wavelength tuning property of output signal laser is studied and the tunable laser pulses of 1.57~1.60 μm are obtained. The experimental results show that the output energy of signal laser at 1.57 μm decreases, and the pulse duration changes to some extent, with the increase of the cavity length of the optical parametric oscillator. When the pump energy is larger, the energy conversion efficiency goes to saturation with the increasing of pump energy, and then drops gradually. And a reasonable interpretation is given theoretically. When the cavity length is 5 cm and the pulse duration of pump laser at 1.06 μm is 30 ns, the pulse duration and output energy of signal laser at 1.57 μm are 2.5 ns and 21.3 mJ respectively. The pulse duration of signal laser at 1.57 μm is only 1/12 of that of the pump laser at 1.06 μm , and the electro-optical energy conversion efficiency is 0.128%.

Key words laser technique; optical parametric oscillator; KTP crystal; pulse duration; signal pulse

1 引言

光参量振荡器(OPO)因其波长调谐范围大, 输出激光波长可定量设计, 高的转换效率和大的输出能量或功率而受到广泛关注。KTP 晶体生长技术成熟, 具有较高的非线性系数和宽的光学透明谱(0.35~4.5 μm), 合适的相位匹配条件和高的损伤

阈值, 而且物化性能稳定, 容易抛光和镀膜, 所以非常适合用于光参量振荡器。十几年来, 国内外对 KTP 光参量振荡器进行了较多的研究, 也取得了较好的实验结果^[1~4]。例如, Marshall 等采用非临界相位匹配 KTP 光学参量转换形式, 获得人眼安全的 1.61 μm 和 1.54 μm 激光^[5]; 王月珠等^[6]利用 Nd:YAG 激光器二次谐波 532 nm 及基频光 1064 nm 作

收稿日期: 2006-02-13; 收到修改稿日期: 2006-04-14

基金项目: 国务院侨办科研基金(05QZR011)和福建省自然科学基金(A0310022)资助项目。

作者简介: 王加贤(1955—), 男, 福建泉州人, 华侨大学信息科学与工程学院教授, 博士, 主要从事激光技术与固体激光器件方面的研究。E-mail: wangjx@hqu.edu.cn

为抽运源,采用临界及非临界相位匹配方式抽运 KTP 光参量振荡器,获得 $1.53\sim 1.84\ \mu\text{m}$ 激光。本文报道在脉冲氙灯抽运的非稳腔 Nd:YAG 调 Q 激光器腔内放置 KTP 晶体,构成内腔式 KTP 光参量振荡器,实现非临界相位匹配单谐振方式运转。还实验研究了信号光的调谐性能,信号光脉冲宽度、输出能量与光参量振荡器腔长的关系,以及在不同抽运能量下信号光的转换效率。

2 实验装置

内腔式 KTP 光参量振荡器的实验装置如图 1 所示。主腔是由凸面镜 M_1 和平面镜 M_3 构成的平凸非稳腔,其中 M_1 的曲率半径为 $-300\ \text{cm}$,对 $1.06\ \mu\text{m}$ 全反射, M_3 对 $1.06\ \mu\text{m}$ 透过率为 10% ,对 $1.57\ \mu\text{m}$ 透过率为 30% ,腔长为 $60\ \text{cm}$;调 Q 器件 A 是小信号透过率为 60% 的 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体,P 为 $1.06\ \mu\text{m}$ 偏振片;光阑 F 的直径为 $2.5\ \text{mm}$,它对 $1.06\ \mu\text{m}$ 激光光斑起限制作用,保证抽运激光的光束质量; $\phi 4\ \text{mm}\times 60\ \text{mm}$ 的 Nd:YAG 棒由单根脉冲氙灯抽运,工作重复率 $1\ \text{Hz}$ 。内腔光参量振荡器由平面镜 M_2 , M_3 和非线性晶体构成,其中 M_2 对 $1.06\ \mu\text{m}$ 高透,对 $1.57\ \mu\text{m}$ 高反;KTP 晶体的尺寸为 $8\ \text{mm}\times 8\ \text{mm}\times 20\ \text{mm}$, x 方向切割,非临界相位匹配($\theta=90^\circ$, $\phi=0^\circ$)。 M_4 为 45° 角对 $1.06\ \mu\text{m}$ 高反, $1.57\ \mu\text{m}$ 高透的镜片,把两种不同波长的激光分开。输出的 $1.57\ \mu\text{m}$ 信号光脉冲由 InGaAs PIN 光电二极管构成的探测器接收(探测器前再插入一块 $1.06\ \mu\text{m}$ 滤光片),并输入到 TDS3032B 型数字示波器(oscillograph,OSC.)上观察和存储。用 PT-1 型激光能量计测量输出能量,用 WGD-300A 型光栅光谱仪测量激光波长。

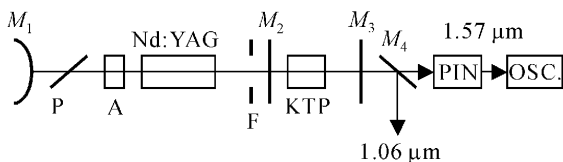


图 1 内腔式 KTP 光参量振荡器实验装置

Fig. 1 Experimental setup of intracavity KTP OPO

内腔式光参量振荡器已有报道^[7],其主要思想是利用腔内较高的 $1.06\ \mu\text{m}$ 激光能量抽运 KTP 晶体,从而降低 Nd:YAG 激光器的电抽运能量,同时获得较高的光参量振荡器的转换效率。与外腔式光参量振荡器相比, $1.06\ \mu\text{m}$ 抽运光子在内腔中的寿

命较长,抽运光往返经过非线性晶体,抽运场中所有的能量储存都可以利用,所以内腔式光参量振荡器有较高的转换效率。

Nd:YAG 激光器采用非稳腔结构是因为非稳腔具有较大而且较均匀的模体积,可以获得比平凹稳定腔较大的能量和较好的光束空间质量,有利于提高光参量振荡器的转换效率。KTP 晶体采用非临界相位匹配适合 $1.06\ \mu\text{m}$ 激光抽运,而且相对于临界相位匹配在接收角、走离角、非线性系数方面都有较大的优势。

3 结果与分析

3.1 激光脉冲波形

KTP 晶体正放置时(抽运光波波矢与晶体 z 轴的夹角为 90°),逐渐增加 Nd:YAG 激光器的电抽运能量,示波器上观察到 $1.57\ \mu\text{m}$ 信号光脉冲。保持 Nd:YAG 激光器的电抽运能量不变,沿腔轴移动 M_2 镜以改变 KTP 光参量振荡器腔长,可以看到 $1.57\ \mu\text{m}$ 信号光脉冲的宽度有所改变。腔长较小时,信号光脉宽随着腔长的增加而有所减小,腔长约为 $5\ \text{cm}$,脉冲最窄;随着腔长的进一步增加,脉冲又变宽。当腔长 L 分别为 $3\ \text{cm}$, $5\ \text{cm}$, $7\ \text{cm}$ 时,脉冲宽度分别为 $4.8\ \text{ns}$, $2.5\ \text{ns}$, $3\ \text{ns}$ 。图 2(a) 是 $1.06\ \mu\text{m}$ 抽运光脉冲 ($20\ \text{ns}/\text{div}$),图 2(b), (c) 是腔长 $L = 3\ \text{cm}$, $5\ \text{cm}$ 时 $1.57\ \mu\text{m}$ 信号光脉冲 ($10\ \text{ns}/\text{div}$)。可以看出,从内腔式 KTP 光参量振荡器输出的抽运光和信号光脉冲的波形不对称,出现前沿陡、后沿缓现象,这与文献[8]的理论分析结果一致;当 $L = 5\ \text{cm}$ 时, $1.57\ \mu\text{m}$ 信号光脉冲宽度 ($2.5\ \text{ns}$) 只是 $1.06\ \mu\text{m}$

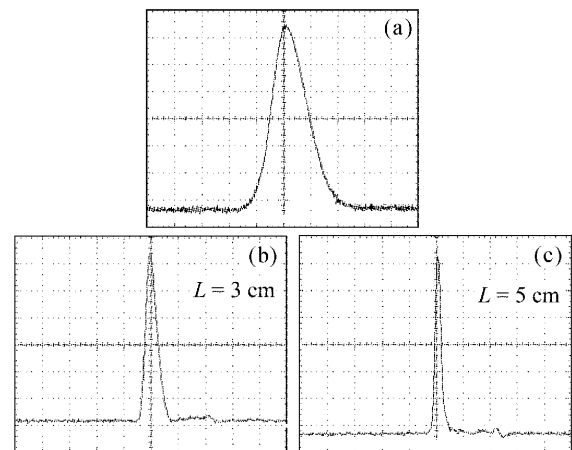


图 2 (a) $1.06\ \mu\text{m}$ 抽运光脉冲和(b), (c)不同腔长的 $1.57\ \mu\text{m}$ 信号光脉冲

Fig. 2 (a) $1.06\ \mu\text{m}$ pump pulse and (b), (c) $1.57\ \mu\text{m}$ signal pulses for the different cavity length

抽运光脉冲宽度(30 ns)的 1/12。

信号光脉冲比抽运光脉冲窄得多,其原因是:1) 对于长脉冲(纳秒量级)抽运的内腔式光参量振荡器,一般信号光从初始噪声建立以后,能与抽运光脉冲产生多次非线性相互作用。光参量振荡具有明显的阈值特性,在抽运光脉冲的前后沿,功率密度较低,没有达到光参量振荡阈值,不会产生信号光输出;信号光只会抽运光脉冲峰值附近的时间内输出,所以信号光脉冲要比抽运光脉冲窄。2) 内腔式 KTP 光参量振荡器的输出镜 M_3 对 $1.06 \mu\text{m}$ 抽运光的反射率高(90%),对 $1.57 \mu\text{m}$ 参量光的反射率相对较低(70%),这样腔内 $1.06 \mu\text{m}$ 光子寿命大于 $1.57 \mu\text{m}$ 光子寿命,从而造成信号光脉冲较窄。

对于一般的调 Q 激光器,激光脉冲随着腔长的增加而变宽,这是因为腔长较大,腔的渡越时间和光子寿命较长,衰减较慢,形成较缓变的后沿。但是,在内腔式光参量振荡器中,影响信号光脉冲宽度的因素除了腔的渡越时间外,还有如下因素:腔长较小,根据 Brosnan 等的阈值公式^[9],信号光振荡的阈值较低,信号光和闲频光较强,在信号光脉冲的中心附近发生信号光与闲频光的复合,一部分能量向抽运光转移,使得抽运光脉冲后沿阈值以下的附近部分获得能量而略超过信号光的振荡阈值。能量又由抽运光向信号光转移,补偿一部分信号光子的衰减,使信号光的后沿衰减变慢,脉冲变宽。

3.2 信号光的调谐性能

波长调谐过程是通过改变晶体 z 轴与抽运光波矢方向的夹角来实现的。当 KTP 晶体的内角 θ 从 $90^\circ \sim 80^\circ$ 变化时(由于晶体尺寸的限制,内角不能再继续减小),用光栅光谱仪测量相应的输出信号光的波长,如图 3 所示。可以看出,KTP 内角变化 10° 时,信号光的调谐范围约为 $1.57 \sim 1.60 \mu\text{m}$ 。在波长调谐过程中,信号光脉冲宽度没有明显变化。

KTP 晶体三个主轴折射率 n 的 Sellmeier 方程为^[10]

$$n^2 = A + \frac{B}{\lambda^2 - C} - D\lambda^2, \quad (1)$$

其中 λ 为光波波长, A, B, C, D 为方程的待定系数,采用的数据由山东大学晶体材料研究所提供。实验中所用的 KTP 晶体为 $x-z$ 平面切割,II 类相位匹配($o \rightarrow o+e$)。抽运光波(波长 λ_p , 折射率 n_p)、信号光波(波长 λ_s , 折射率 n_s)、闲频光波(波长 λ_i , 折射率 n_i) 在非线性晶体内相互作用满足的动量守恒、能量守恒方程分别为

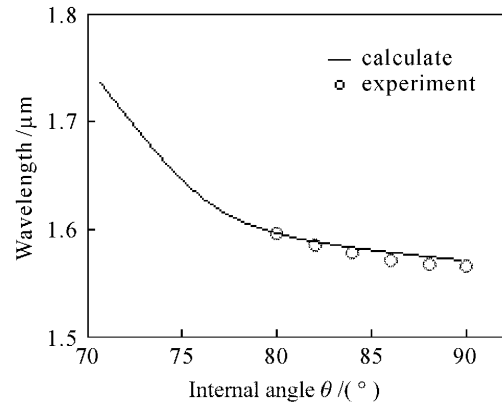


图 3 KTP 光参量振荡器的波长调谐

Fig. 3 Wavelength tuning curve of KTP OPO

$$\frac{n_p}{\lambda_p} = \frac{n_s}{\lambda_s} + \frac{n_i}{\lambda_i}, \quad \frac{1}{\lambda_p} = \frac{1}{\lambda_s} + \frac{1}{\lambda_i}, \quad (2)$$

在 $x-z$ 平面内菲涅耳方程简化为

$$[\sin^2 \theta / (1/n^2 - 1/n_x^2)] + [\cos^2 \theta / (1/n^2 - 1/n_z^2)] = 0, \quad (3)$$

其中 θ 为抽运光波矢方向与晶体 z 轴的夹角, n_x 与 n_z (都为 λ 的函数) 为 KTP 晶体的主轴折射率式。根据上述关系及(1)式中的 A, B, C, D 系数,计算出的波长调谐曲线如图 3 中实线所示。当 θ 从 $90^\circ \sim 80^\circ$ 变化时,理论值与实验结果基本符合。

3.3 输出能量与腔长的关系

在抽运 Nd:YAG 脉冲氙灯的电注入能量(16.7 J)不变的情况下,移动 M_2 镜,测量不同腔长的光参量振荡器的输出能量,如图 4 所示(图中实线是实验数据点的三次拟合曲线)。可以看出,输出的信号光能量随腔长的增加而降低。当 $L = 3 \text{ cm}$ 时,能量为 24 mJ;当 $L = 10 \text{ cm}$ 时,能量降到 9 mJ。这是因为在抽运能量和抽运光脉冲宽度不变的情况下,腔长越小,信号光在腔内的渡越时间越短,获得增益的时间就越长,所以相应信号光的能量就越大。

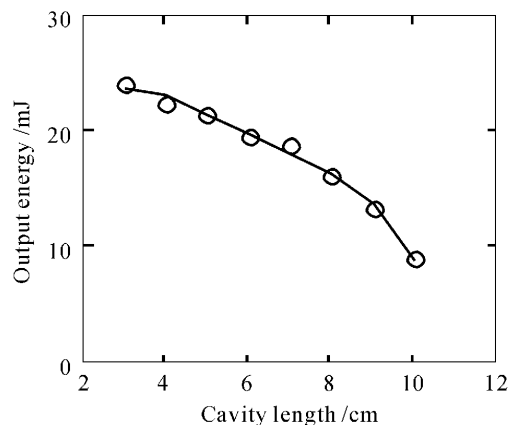


图 4 输出能量与腔长的关系

Fig. 4 Output energy versus cavity length

3.4 能量转换效率

当 KTP 光参量振荡器的腔长 $L = 3$ cm 和 7 cm 时,分别测量在不同抽运能量下的输出能量,并计算相应的转换效率(转换效率定义为 $1.57 \mu\text{m}$ 激光能量与抽运 Nd:YAG 脉冲氙灯的电注入能量之比),如图 5 所示。可以看出,当抽运能量较小时,转换效率随抽运能量的增加而增加;当抽运能量增加到一定值时,转换效率有趋于饱和的趋势;再增加抽运能量(对于 $L = 3$ cm,电注入能量约为 15.8 J,对于 $L = 7$ cm,电注入能量约为 16.7 J),转换效率开始下降。当电注入能量为 16.7 J 时,对于 $L = 3$ cm,转换效率为 0.143%;对于 $L = 5$ cm,转换效率为 0.128%;对于 $L = 7$ cm,转换效率为 0.112%。

转换效率趋于饱和的原因是:1) 一定的谐振腔,抽运能量存在一个最佳值,超过这个值后,腔内会发生强的参量逆过程 ($\omega_s + \omega_i \rightarrow \omega_p$),它将抑制正过程 ($\omega_p \rightarrow \omega_s + \omega_i$) 的产生,从而导致转换效率的下降,其中 $\omega_i, \omega_p, \omega_s$ 分别为闲频光、抽运光、信号光的圆频率;2) 在较大抽运能量下,KTP 晶体产生热效应,破坏了原来的相位匹配条件,导致转换效率不再增加甚至下降。

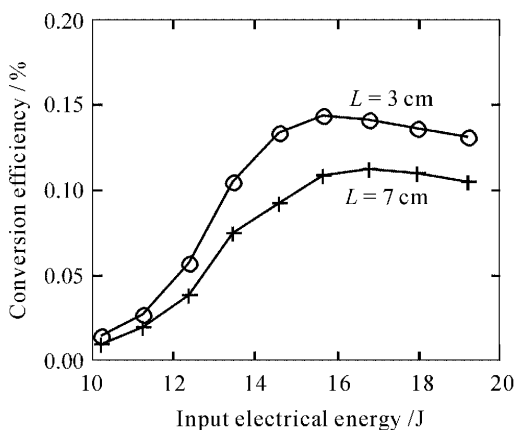


图 5 转换效率与电注入能量的关系

Fig. 5 Conversion efficiency versus input electrical energy

4 结 论

在非稳腔 Nd:YAG 调 Q 激光器腔内放置非临界相位匹配 KTP 晶体,构成内腔式单谐振 KTP 光

参量振荡器。实验结果表明,这种内腔式的非临界相位匹配 KTP 光参量振荡器由于输出能量和脉冲宽度都有一定的优势,可望在实际中得到应用。

参 考 文 献

- 1 J. A. C. Terry, Y. Cui, Y. Yang *et al.*. Low-threshold operation of an all-solid-state KTP optical parametric oscillator [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1994, **11**(5):758~769
- 2 P. B. Phua, K. S. Lai, R. Wu. Multiwatt high-repetition-rate 2- μm output from an intracavity KTiOPO₄ optical parametric oscillator [J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(9):1435~1439
- 3 Bao Zhao-ri-ge-tu, 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
- 4 Ding Xin, Shi Xiangchun, Yu Yizhong *et al.*. Study of KTP single resonant optical parametric oscillator pumped by pulsed tunable Ti:sapphire lasers [J]. *Acata Optica Sinica*, 2001, **21**(4):444~446
丁欣,施翔春,于意仲等. 可调谐钛宝石激光抽运的 KTP 单谐振光学参量振荡器的研究[J]. *光学学报*, 2001, **21**(4):444~446
- 5 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
- 6 Wang Yuezhu, Yao Baoquan, Wang Qi. KTP optical parametric oscillator with both critically and non-critically phase-matching [J]. *Acata Optica Sinica*, 2000, **20**(10):1368~1373
王月珠,姚宝权,王 骐. 临界及非临界相位匹配 KTP 光学参量振荡器[J]. *光学学报*, 2000, **20**(10):1368~1373
- 7 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
- 8 Yao Baoquan, Wang Yuezhu, Liu Qiang *et al.*. Analysis of influence of phase conjugate laser upon the threshold of optical parametric oscillator [J]. *Acata Optica Sinica*, 2002, **22**(1):45~49
姚宝权,王月珠,柳 强等. 相位共轭激光对光学参量振荡器阈值影响的分析[J]. *光学学报*, 2002, **22**(1):45~49
- 9 S. J. Brosnan, R. L. Byer. Optical parametric oscillator threshold and line width studies [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1979, **QE-15**(6):415~431
- 10 K. Kato. Second-harmonic and sum-frequency generation to 4950 and 4589 \AA in KTP [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1988, **QE-24**(1):3~4