

文章编号: 0258-7025(2003)02-0113-04

## 被动调 Q 人眼安全内腔光学参量振荡器

柳强, 巩马理, 闫平, 王东生

(清华大学精密仪器系, 北京 100084)

鞠有伦, 姚宝权, 王月珠, 王骥

(哈尔滨工业大学光电子技术研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要** 利用被动调 Q 内腔光学参量振荡器动力学模型, 求解了包含内腔光学参量振荡器的被动调 Q 速率方程, 讨论了被动调 Q 内腔光学参量振荡器的动力学过程。实验上实现了被动调 Q 内腔光学参量振荡器运转, 获得了脉宽小于 5 ns, 能量大于 20 mJ 的 1.57  $\mu\text{m}$  人眼安全激光输出, 通过改变 OPO 谐振腔输出镜的反射率, 观测到输出单个和多个信号光脉冲现象, 实验结果与理论分析相吻合。

**关键词** 光电子学; 速率方程; 被动调 Q; 光学参量振荡器; 反转粒子数密度

**中图分类号** TN 248.1 **文献标识码** A

### Passively Q-switched Laser with Intracavity Optical Parametric Oscillator for Eye-safe-output

LIU Qiang, GONG Ma-li, YAN Ping, WANG Dong-sheng

(Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

JU You-lun, YAO Bao-quan, WANG Yue-zhu, WANG Qi

(Institute of Opto-Electronics, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

**Abstract** On a basis of passively Q-switched laser dynamical model, a rate equation of a passively Q-switched intracavity optical parametric oscillator (OPO) was calculated and the dynamical process of internal OPO was discussed. The 1.57  $\mu\text{m}$  parametric output with power of 15mJ is obtained and the one or several pulses were observed for different signal cavity reflectivity experimentally. The theoretical calculation was coincident with experiment results well.

**Key words** optoelectronics; rate equation; passively Q-switched; optical parametric oscillator; population inversion; dynamical process

## 1 引言

光学参量振荡技术(OPO)作为频率变换的重要手段,常常用来得到人们感兴趣的波长,但通常所说的OPO几乎都是针对外腔OPO所展开的,对于外腔OPO,抽运激光和OPO是相互独立的。OPO对抽运激光是没有影响的,因此OPO和抽运激光可以作为相互独立的部分分别考虑。对于内腔OPO,抽运激光和OPO之间是相互影响的,在计算过程中必须将其作为一个整体加以考虑<sup>[1~3]</sup>。我们曾经报道了主动电光调Q内腔OPO的运转特

性<sup>[4,5]</sup>,相对于主动调Q内腔OPO而言,被动调Q的内腔OPO模型就更为复杂,与主动调Q内腔OPO的最大区别在于:在OPO没有形成前,主动调Q内腔OPO的抽运脉冲永远都是单脉冲,被动调Q的内腔OPO的抽运脉冲由于被动调Q的特性有可能是多脉冲。因此,为了获得被动调Q内腔OPO单脉冲输出,对被动调Q内腔OPO的参数进行合理优化显得尤为重要。Florida大学研究人员数值模拟了全固态Cr:YAG被动调QNd:YLF内腔OPO的运转过程。并在实验上获得了1mJ的小能量1.6 $\mu\text{m}$ 激光输出<sup>[6,7]</sup>。本文利用被动调Q内腔

收稿日期:2001-11-14; 收到修改稿日期:2002-01-18

作者简介:柳强(1971—),男,清华大学精密仪器系博士后,博士,主要从事全固态激光器及激光频率变换技术研究。E-mail:liuqiang@tsinghua.org.cn

光学参量振荡器动力学模型,求解了包含内腔光学参量振荡器的染料被动调 Q Nd:YAG 速率方程,讨论了被动调 Q 内腔光学参量振荡器的动力学过程。并且实验上在氙灯抽运的染料片被动调 Q Nd:YAG 激光腔内,实现了线型结构非临界相位匹配 KTP 光参量振荡器运转,获得了脉宽小于 5 ns,能量大于 20 mJ 的 1.57  $\mu\text{m}$  人眼安全激光输出。通过改变 OPO 谐振腔输出镜的反射率,观测到输出单个和多个信号光脉冲现象,实验结果与理论分析相吻合。

## 2 被动调 Q 内腔光参量振荡器的动力学过程

针对后面的实验装置,被动调 Q 内腔 OPO 可以简单地由图 1 加以描述,主腔为激光谐振腔,由  $M_1$  和  $M_2$  组成,对振荡激光具有高的反射率。内腔 OPO 由放入激光腔内的非线性晶体 KTP 和  $M_3$ ,  $M_4$  组成,  $M_4$  为 OPO 输出镜,  $M_3$  对信号光高反、对抽运光高透,  $M_5$  为滤光片。首先给出包含内腔 OPO 的被动调 Q 的速率方程<sup>[3]</sup>

$$\frac{dE_p(t)}{dt} = \left[ \frac{\sigma n l}{t_r} - \frac{\sigma_{gs} n_{gs} l_s + \sigma_{es} n_{es} l_s}{t_r} - \frac{\ln\left(\frac{1}{R}\right) + L}{2t_r} \right] \cdot E_p - \frac{\delta \omega_p I}{4\epsilon_p} \frac{l_{\text{opo}}}{l'} \frac{l_{\text{crystal}}}{l_{\text{opo}}} E_s(t) E_i(t) \sin\varphi(t) \quad (1)$$

$$\frac{dE_s(t)}{dt} = -\frac{E_s(t)}{2\tau_s} - \frac{\delta \omega_s I}{4\epsilon_s} \frac{l_{\text{crystal}}}{l_{\text{opo}}} E_p(t) E_i(t) \sin\varphi(t) \quad (2)$$

$$\frac{dE_i(t)}{dt} = -\frac{E_i(t)}{2\tau_i} - \frac{\delta \omega_i I}{4\epsilon_i} \frac{l_{\text{crystal}}}{l_{\text{opo}}} E_p(t) E_s(t) \sin\varphi(t) \quad (3)$$

$$\frac{dn}{dt} = -\gamma \frac{\sigma c E_p^2(t) n}{4\hbar\omega_p} \quad (4)$$

$$\frac{dn_{gs}}{dt} = -\gamma \frac{\sigma_{gs} c E_p^2(t) n_{gs}}{4\hbar\omega_p} \quad (5)$$

$$\frac{dn_{es}}{dt} = -\gamma \frac{\sigma_{es} c E_p^2(t) n_{es}}{4\hbar\omega_p} \quad (6)$$

$$n_{gs} + n_{es} = n_0 \quad (7)$$

其中,  $n$  为激光介质反转粒子数密度,  $\sigma$  为激光介质受激发射截面,  $\sigma_{gs}$ ,  $\sigma_{es}$  为饱和吸收体的基态和激发态吸收截面,  $n_{gs}$ ,  $n_{es}$ ,  $n_0$  分别为饱和吸收体基态、激发态和反转粒子数密度,  $R$  为 OPO 输出镜反射率,  $t_r = 2 \frac{l'}{c}$ ,  $l'$  为激光谐振腔光学长度,  $\tau_s$ ,  $\tau_i$  分别为 OPO 腔内信号光和闲频光光子寿命,  $\gamma$  为反转因子,  $l_s$  为饱和吸收体长度,  $l_{\text{opo}}$  为 OPO 谐振腔腔长,  $l_{\text{crystal}}$  为 OPO 晶体长度,  $\omega_p$ ,  $\omega_s$ ,  $\omega_i$  分别为抽运光、信号光和闲频光的角频率,  $\delta = \epsilon_0 d_{\text{eff}}$ ,  $d_{\text{eff}}$  为有效非线性系数,  $\epsilon_0$  为真空介电常数。联立方程(1)~(7), 利用 Runge-Kutta 法数值求解。理论计算过程中,选择的参数与后面的实验是一致的, OPO 晶体为 KTP, 采用非临界相位匹配切割方式 ( $\theta = 90^\circ$ ,  $\varphi =$

$0^\circ$ ), 长度为 20 mm, OPO 腔长为 25 mm, 输出信号光波长为 1.57  $\mu\text{m}$ , 抽运源为氙灯抽运 Nd:YAG, 棒的尺寸为  $\phi 6 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$ , 激光上能级寿命为 230  $\mu\text{s}$ , 受激发射截面积为  $8.7 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ , 激光器的腔长为 300 mm, 染料片的厚度为 0.13 mm, 基态  $\sigma_{gs}$  和激发态  $\sigma_{es}$  的吸收截面积分别为  $1 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$  和  $2.4 \times 10^{-17} \text{ cm}^2$ 。假设在完全相位匹配的条件下,  $\Delta k = k_p - k_s - k_i = 0$ ,  $I = 0$ ,  $\varphi(t) = \pi/2$ 。

求解方程(1)~(7)组成的方程组,得到的染料片被动调 Q 内腔 OPO 的动力学过程如图 2, 3 所示,由于染料片的损耗与激光腔中光强有着强烈的非线性关系,工作物质受氙灯抽运的初期,腔内自发辐射的光强较弱,染料片的吸收较高,激光振荡不能形成,当腔内光强使得染料片漂白后,抽运脉冲建立起来,达到 OPO 阈值以后, OPO 信号光脉冲也开始建立。从图中看出, OPO 输出镜的反射率为 45% 时,产生的抽运脉冲和 OPO 信号光脉冲都为单脉冲,表明由于 OPO 输出镜的反射率较低,导致 OPO 的阈值高,抽运脉冲建立前,激光腔内的损耗较大, OPO 形成以后,激光上能级反转粒子数在 Q 开关关断前几乎一次跃迁到激光下能级,这就意味着储存

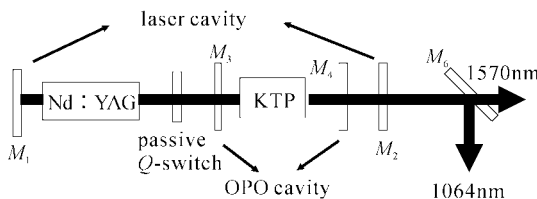


图 1 被动调 Q 内腔 OPO 简图

Fig. 1 Synoptic scheme of passive Q-switched IOPO

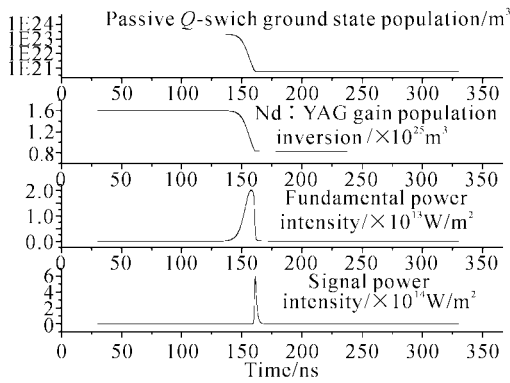


图 2 被动调 Q 内腔 OPO 输出耦合镜反射率为 45% 时的模拟计算结果

Fig. 2 Passively Q-switch IOPO results when OPO output coupler reflectivity is 45%

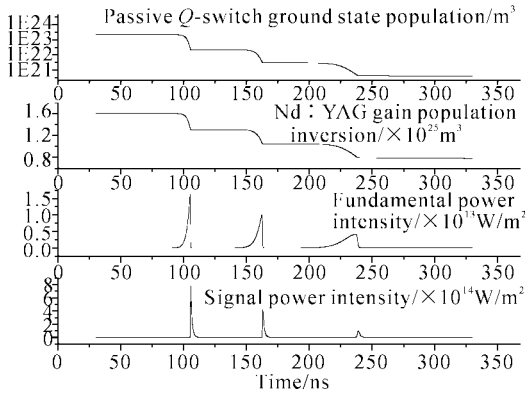


图 3 被动调 Q 内腔 OPO 输出耦合镜反射率为 90% 时的模拟计算结果

Fig. 3 Passively Q-switch IOPO results when OPO output coupler reflectivity is 90%

在激光介质中的大部分能量都转化为抽运脉冲和用来产生信号光。提高 OPO 输出镜的反射率达到 90%，此时就会出现多个抽运脉冲，从而也会产生多个信号脉冲现象，对于图中的计算结果可以简单地加以解释，由于 OPO 输出耦合镜反射率的提高，降低了 OPO 的阈值，相对而言，激光腔内的损耗减小，抽运脉冲建立的时间提前，这在图 2 和图 3 中可以清楚地看到，Q 开关第一次打开后，激光介质上能级一定数量的反转粒子数跃迁到激光下能级，产生了一个抽运脉冲和信号光脉冲，此时腔内光强由于产生信号光衰减很大，不足以使染料片漂白，Q 开关关断。但由于上能级仍残留一定的粒子数，使得腔内光强又不断地增大，又一次使 Q 开关漂白，而产生第二个抽运脉冲，抽运功率再一次达到产生信号光的参振阈值，从而又出现第二个信号光脉冲。如

此下去就可能出现三脉冲抽运，产生三个信号光脉冲的现象。避免出现多脉冲的有效方法是增加 OPO 的透射输出，从而增大 OPO 的阈值，延迟信号光的建立时间。

### 3 实验结果及分析

以上都是理论计算仿真结果，对这个模型进行了实验验证，实验装置见图 1，实验中的 Nd:YAG 晶体，KTP 晶体，染料片的厚度，腔长，谐振腔结构等参数与仿真计算所用的参数是一致的。实验中抽运光和输出的信号光脉冲波形是通过滤光片  $M_6$  后利用 PIN 管配合数字存储示波器同时测得的结果，如图 4, 5 所示。

正如前面理论计算结果显示的那样，当  $R = 0.45$  时，OPO 的阈值相对较高，产生的抽运脉冲和 OPO 输出的信号光都为单脉冲，从图 5(b) 中 OPO 形成后衰减的抽运脉冲可以看出，OPO 产生后抽运脉冲衰减较大，但上能级仍然残留一定的粒子数，抽运脉冲仍然存在着增益放大，由于上能级残留的粒子数较少，通过增益放大产生的新的抽运脉冲能量也较小，还没有达到 OPO 的阈值，因此输出的信号光脉冲为单脉冲。增加 OPO 输出镜后对信号光的反射率达 90%，此时抽运脉冲已经明显变为双脉冲，由于 OPO 的阈值较低，信号光建立的时间较短，并很快形成稳定的输出，此时上能级残留的粒子数较多，这使抽运脉冲重新具有建立一定强度新脉冲的能力，新脉冲重新抽运 OPO，从而产生新的信号光脉冲。继续增加 OPO 输出镜的反射率可以推断，抽运脉冲和 OPO 产生的信号光脉冲的脉冲个数会更多。由 OPO 输出信号光的脉冲波形还可以看出，相对于抽运脉冲而言，OPO 输出信号光脉冲宽度小于抽运激光的脉冲宽度（多脉冲是指第一个脉冲宽度），这是由于 OPO 具有明显的阈值行为，而且 OPO 是三波相互作用过程，产生的信号波和闲频波一定在抽运脉冲持续的时间内。多脉冲在实际应用中是应该避免的，短脉冲在实际应用中是很有利的，如激光脉冲测距，短脉冲激光源可以提高测距精度。

在实验中，同时也监测了 OPO 输出的稳定度，在阈值附近稳定度较差，当抽运能量为阈值的 3 倍左右时，OPO 输出稳定最好（小于 5%），分析影响参量输出能量稳定度的主要因素为：抽运能量的不稳定，被动调 Q 不稳定，晶体升温等。

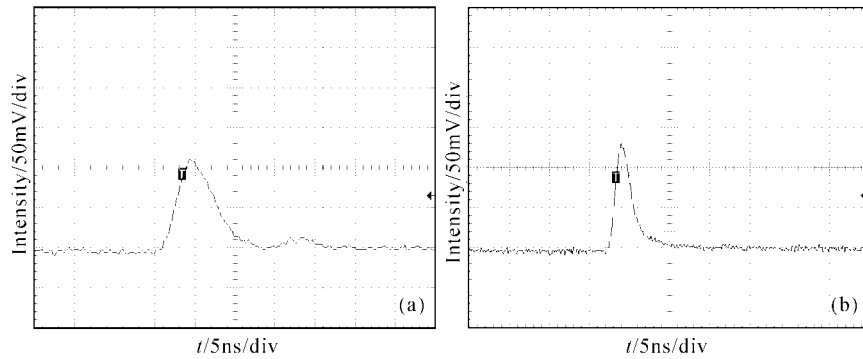


图 4 被动调 Q 内腔 OPO 输出耦合镜反射率为 45% 时, 抽运脉冲波形(a)与输出信号光脉冲波形(b)  
Fig. 4 Pump pulse waveform (a) and signal pulse waveform (b) when OPO output coupler reflectivity 45%

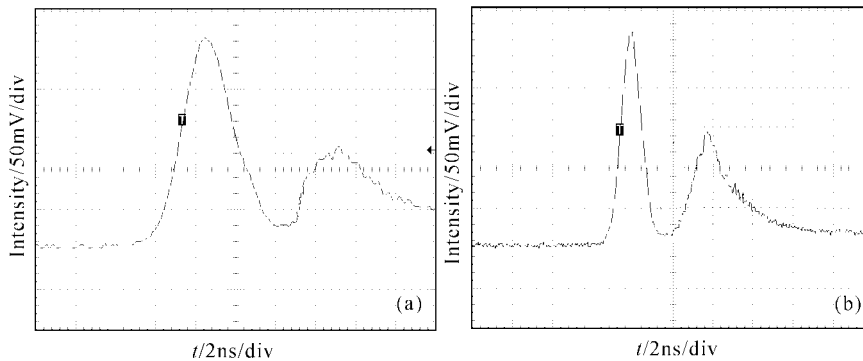


图 5 被动调 Q 内腔 OPO 输出耦合镜反射率为 90% 时, 抽运脉冲波形(a)与输出信号光脉冲波形(b)  
Fig. 5 Pump pulse waveform (a) and signal pulse waveform (b) when OPO output coupler reflectivity 90%

## 4 结 论

理论计算和实验结果均表明, 通过控制 OPO 输出镜的反射率, 完全可以得到一个信号光单脉冲。输出信号光的脉冲个数依赖 OPO 输出镜对信号光的反射率的大小。通过选择合适的 OPO 输出耦合镜, 实验上获得了脉宽小于 5 ns, 能量大于 20 mJ 的  $1.57 \mu\text{m}$  人眼安全激光输出。整个装置具有体积小、结构简单、价格便宜的优点, 但由于染料片的化学性能和热性质不佳, 损伤阈值也较低, 所以整个装置工作只能工作在重复频率 1 Hz 的条件下。相信如果利用损伤阈值高、热导性能好的 Cr:YAG 作为被动调 Q 材料, 输出稳定性和工作的重复频率可以得到提高, 这项研究工作正在进行中。

### 参 考 文 献

- 1 E. O. Ammann, J. M. Yarborough, M. K. Oshman *et al.*. Efficient internal optical parametric oscillation [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1970, **16**(8):309~312
- 2 J. Falk, J. M. Yarborough, E. O. Ammann. Internal optical parametric oscillation [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1971, **QE-7**(7):359~369
- 3 T. Debuisschert, J. Raffy, J. P. Pochelle *et al.*. Intracavity optical parametric oscillator: study of the dynamics in pulsed regime [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1996, **13**(7):1569~1587
- 4 Liu Qiang, Ju Youlun, Yao Baoquan *et al.*. Research of properties of an internal optical parametric oscillator (IOP) and optical parametric amplifier (IOPA) [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1999, **A26**(8):683~686 (in Chinese)
- 5 Liu Qiang, Wang Yuezhu, Yao Baoquan *et al.*. Intracavity optical parametric oscillation in pulsed regime [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(10):1228~1234 (in Chinese)
- 6 Guohua Xiao, Michael Bass, Madhu Acharekar. Passively Q-switched solid-state lasers with intracavity optical parametric oscillators [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1998, **34**(11):2241~2245
- 7 L. R. Marshall, J. Kasinski, A. D. Hays *et al.*. Efficient optical parametric oscillator at  $1.6 \mu\text{m}$  [J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(9):681~683