

# 内腔式被动调 $Q$ 光学参量振荡器动力学特性研究

苗杰光<sup>1</sup> 赵艳艳<sup>2</sup> 徐志敬<sup>1</sup> 姚繁蕾<sup>1</sup>

<sup>1</sup>哈尔滨工业大学(威海)信息光电子研究所, 山东 威海 264209

<sup>2</sup>威海职业学院信息工程系, 山东 威海 264210

**摘要** 从被动调 $Q$ 四能级激光器的速率方程出发,通过引入光学参量振荡(OPO)有效转换截面的概念,建立被动调 $Q$ 单谐振内腔光学参量振荡器(IOPO)的理论模型。推导考虑晶体吸收、走离效应、模式匹配等参数的单谐振 IOPO 增益表达式以及有效转换截面表达式。利用 Runge-Kutta 法数值模拟 IOPO 的动力学特性,讨论信号光脉冲的建立过程,分析耦合输出镜的信号光反射率对抽运光和信号光间的能量转换过程以及信号光脉冲的建立时间和脉冲宽度的影响,结果表明,信号光反射率存在一个最优值为 0.85。将模拟结果和实验结果进行比较,两者的吻合度较好。对理解被动调 $Q$ 单谐振 IOPO 的工作机理及 IOPO 系统的优化设计提供理论依据。

**关键词** 激光器;理论模型;数值模拟;光学参量振荡器;被动调 $Q$

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0902007

## Study on Dynamic Characteristics of the Passively $Q$ -Switched Intracavity Optical Parametric Oscillators

Miao Jieguang<sup>1</sup> Zhao Yanyan<sup>2</sup> Xu Zhijing<sup>1</sup> Yao Yilei<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Information and Opto-Electronics, Harbin Institute of Technology (Weihai),*

*Weihai, Shandong 264209, China*

<sup>2</sup>*Department of Information Engineering, Weihai Vocational College, Weihai, Shandong 264210, China*

**Abstract** Based on the rate equations for passively  $Q$ -switched four-level lasers, and by introducing the concept of optical parametric oscillator (OPO) effective conversion cross-section, a model for the passively  $Q$ -switched single resonant intracavity optical parametric oscillator (IOPO) is built. The parametric gain expression which taking account of the absorption loss of the material, walk-off effect, mode matching, etc., and also the OPO effective conversion cross-section expression are deduced. By using the Runge-Kutta method, the dynamic characteristics of the IOPO are simulated. Moreover, the buildup process of the signal pulse is discussed, and the impacts of the signal reflectivity on the energy conversion process and on the buildup time and pulse duration of the signal pulses are analyzed. The simulation results reveal that there is an optimal value for the signal reflectivity which is 0.85. Besides, the simulation results and experimental results are compared, and they match very well. The findings provide a theoretical basis for understanding the performance mechanism and optimization of the passively  $Q$ -switched single resonant IOPO.

**Key words** lasers; theoretical model; numerical simulation; optical parametric oscillator; passively  $Q$ -switching

**OCIS codes** 140.3430; 190.4970; 140.3540; 140.3580

## 1 引言

光学参量振荡(OPO)技术是丰富和拓展全固体激光器波长范围的有效途径。与传统可调谐激光器相比,OPO具有调谐范围宽、转换效率高特点,在光谱分析、生物医疗、军事等领域具有十分广阔的应用前

收稿日期: 2015-03-27; 收到修改稿日期: 2015-04-25

基金项目: 国家自然科学基金(61108008)

作者简介: 苗杰光(1979—),男,副教授,硕士生导师,主要从事全固体激光器等方面的研究。E-mail: mjgbhk@163.com

景<sup>[1-3]</sup>。一般而言,基于双折射相位匹配技术的OPO阈值功率密度较高(40~100 MW/cm<sup>2</sup>)<sup>[4]</sup>。虽然准相位匹配技术可有效降低OPO阈值,但用于实现准相位匹配的周期性极化晶体技术还不够成熟,且价格非常昂贵。目前对于OPO的研究大都集中在调Q脉冲运转方式。降低OPO阈值的另一种途径是内腔光学参量振荡器(IOPO)。得益于抽运腔内极高的功率密度,IOPO不仅可有效降低抽运水平,还可获得双程增益<sup>[5]</sup>。近年来,IOPO特别是1.5~1.6 μm非临界相位匹配人眼安全IOPO,已被广泛、深入地报道<sup>[6-8]</sup>,成为全固体激光领域的一大研究热点。

由于IOPO与抽运光共用部分或整个谐振腔,所以两者的运转特性是相互关联的。实际上,IOPO的运转过程具有典型的腔倒空特性<sup>[9]</sup>。另一方面,在信号光和空闲光功率密度较高的情况下,还可能发生逆转换过程。因此,研究IOPO的动力学特性对于理解参量转换过程及IOPO的优化设计意义重大。1968年,Oshman等<sup>[10]</sup>从自相关方程出发,建立了IOPO参量转换的运动方程,但它只适用于连续波运转的IOPO。1996年,Debuisschert等<sup>[11]</sup>从三波相互作用的耦合波方程出发,提出了一种描述单谐振调Q运转IOPO的速率方程组。此后,又有多个研究小组以Debuisschert的理论模型为基础,对IOPO动力学特性进行了报道<sup>[12-14]</sup>。然而,上述理论模型均过于复杂,大都仅适用于双谐振IOPO,且未考虑抽运光和信号光模式匹配的影响。

从被动调Q四能级激光器的速率方程出发,通过引入IOPO有效转换截面,提出了一种简单、易懂的,描述被动调Q单谐振IOPO动力学特性的理论模型。该模型不仅考虑了饱和吸收体激发态吸收(ESA)效应的影响,还考虑了抽运光和信号光间模式匹配等参数的影响。通过对该理论模型进行数值求解,分析和讨论了被动调Q单谐振IOPO的动力学特性及影响OPO参量转换过程的几个因素。

## 2 理论模型

### 2.1 被动调Q单谐振IOPO速率方程

确立以下IOPO模型:抽运源为激光二极管(LD)端面抽运的Cr:YAG被动调Q固体激光器;OPO以信号光单谐振方式运转;抽运光与OPO共用部分谐振腔,且两个谐振腔镜对抽运光均为高反射。为得到IOPO速率方程,先给出考虑(ESA)及腔内聚焦效应的被动调Q四能级激光器的速率方程<sup>[15]</sup>:

$$\begin{cases} \frac{dn}{dt} = -c\sigma\varphi n \\ \frac{d\varphi}{dt} = \frac{l_c}{l}c\sigma n(\varphi + \Delta\varphi) - \frac{l_s}{l}c\varphi(\sigma_{gs}n_{gs} + \sigma_{es}n_{es}) - \frac{\varphi}{l_r} \left[ \ln\left(\frac{1}{R}\right) + L \right] \\ \frac{dn_{es}}{dt} = \frac{A}{A_s}c\sigma_{gs}\varphi n_{gs} \\ n_{gs} + n_{es} = n_{s0} \end{cases} \quad (1)$$

式中 $n$ 为激活介质中反转粒子数密度, $\Delta\varphi$ 和 $\varphi$ 分别为基频光荧光辐射粒子数密度和光子数密度, $n_{gs}$ 、 $n_{es}$ 、 $n_{s0}$ 分别为饱和吸收体基态、激发态、总的粒子数密度, $\sigma$ 为激活介质的发射截面, $\sigma_{gs}$ 和 $\sigma_{es}$ 分别为饱和吸收体基态和激发态的吸收截面, $l$ 、 $l_c$ 、 $l_s$ 分别为基频光谐振腔、激活介质、饱和吸收体的长度, $L$ 和 $l_r$ 分别为腔内基频光的往返损耗和往返时间, $R$ 为耦合输出镜对基频光的反射率, $A/A_s$ 为激活介质和饱和吸收体中有效截面的比值, $c$ 为真空中的光速。

由非线性光学理论可知,OPO运转过程中,抽运光场和参量光场不断地发生耦合,进而实现能量转移。参量光的产生过程,可看成是对腔内抽运光非线性损耗的过程。基于此,在(1)式中引入乘积项( $c\sigma_{\text{opo}}\varphi_s\varphi_p l_n/l_p$ )来表示信号光的产生对抽运光的损耗( $\varphi_s$ 为信号光子数密度, $\sigma_{\text{opo}}$ 为OPO有效转换截面, $l_n$ 为非线性晶体长度)。由参量转换的能量守恒定律可知,该乘积项也决定了信号光子数密度随时间的演化。因此,被动调Q单谐振IOPO的速率方程组建立如下:

$$\begin{cases} \frac{dn}{dt} = -c\sigma_p \varphi_p n \\ \frac{d\varphi_p}{dt} = \frac{l_c}{l_p} c\sigma_p n(\varphi_p + \Delta\varphi_p) - \frac{l_n}{l_p} c\sigma_{\text{opo}} \varphi_s \varphi_p - \frac{l_s}{l_p} c\varphi_p (\sigma_{gs} n_{gs} + \sigma_{cs} n_{cs}) - \frac{\varphi_p}{l_{rp}} \left[ \ln\left(\frac{1}{R_p}\right) + L_p \right] \\ \frac{d\varphi_s}{dt} = \frac{l_n}{l_p} c\sigma_{\text{opo}} \varphi_p (\varphi_s + \Delta\varphi_s) - \frac{\varphi_s}{l_{rs}} \left[ \ln\left(\frac{1}{R_s}\right) + L_s \right] \\ \frac{dn_{cs}}{dt} = \frac{A}{A_s} c\sigma_{gs} \varphi_p n_{gs} \\ n_{gs} + n_{cs} = n_{s0} \end{cases}, \quad (2)$$

式中  $\Delta\varphi_s$  为信号光荧光辐射粒子数密度,  $R_s$  为耦合输出镜对信号光的反射率,  $L_s$  为信号光往返损耗, 角标含有“p”的参数表示 OPO 抽运光对应参数, 其物理意义同(1)式。显然,  $\sigma_{\text{opo}}$  是影响 IOPO 性能的重要参数, 它决定了参量转换的动力学过程及参量转换效率, 下面利用 OPO 的增益表达式, 来推导  $\sigma_{\text{opo}}$  的具体表达形式。

### 2.2 IOPO 增益及有效转换截面

由于 IOPO 谐振腔镜对抽运光高反射, 在小信号近似下可有  $dE_p(z)/dz=0$ , 故三波相互作用的耦合波方程简化为<sup>[16]</sup>

$$\begin{cases} \frac{dE_s}{dz} + \alpha_s E_s = iB_s E_p E_i^* \exp(-i\Delta kz) \\ \frac{dE_i}{dz} + \alpha_i E_i = iB_i E_p E_s^* \exp(-i\Delta kz) \end{cases}, \quad (3)$$

假设  $\alpha_s = \alpha_i = \alpha$ , 非线性晶体的长度为  $l$ , 则(3)式中第一式的解为

$$E_s(l) = \left\{ E_s(0) \exp(-\alpha l) \left[ \cosh(g\ell) - i \frac{\Delta k}{2g} \sinh(g\ell) \right] - i \frac{B_s E_p}{g} E_{i0} \sinh(g\ell) \right\} \exp(-i\Delta k l / 2), \quad (4)$$

式中  $\ell$  是有效参量增益长度,  $g$  为信号光的参量增益系数, 且有:

$$\ell = l_w \operatorname{erf}\left(\frac{\sqrt{\pi}}{2} \frac{l}{l_w}\right), \quad g = [\Gamma^2 - (\Delta k / 2)^2]^{1/2}, \quad (5)$$

式中

$$l_w = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \frac{w_p}{\rho} \sqrt{\frac{w_p^2 + w_s^2}{w_p^2 + w_s^2 / 2}}, \quad \Gamma^2 = \kappa g_s I_p, \quad (6)$$

式中  $\rho$  为信号光的走离角,  $w_p$  和  $w_s$  分别为非线性晶体中抽运光和信号光的束腰半径。假设初始时刻在晶体的入射端空闲光的光子数为零, 即初始条件  $E_{i0} = 0$ , 则由(4)式可得信号光通过晶体的单程增益为

$$G = \left| \frac{E_s(l)}{E_s(0)} \right|^2 - 1 = [\exp(-2\alpha l) - 1] \cosh^2(g\ell) + (\Gamma/g)^2 \sinh^2(g\ell). \quad (7)$$

假设抽运光和参量光实现完全相位匹配, 即  $\Delta k = 0$ , 非线性晶体对信号光透明, 即吸收系数  $\alpha = 0$ , 则在小信号近似下单谐振 IOPO 的增益可简化为

$$G = \sinh^2(\Gamma\ell) \approx \Gamma^2 \ell^2, \quad (8)$$

若设每个抽运光子对 OPO 增益的贡献值为 1, 则在整个 OPO 有效模体积内的增益应与 OPO 的单程增益相等, 即有

$$\Gamma^2 \ell^2 = \sigma_{\text{opo}} \ell \varphi_p, \quad (9)$$

考虑到,

$$\kappa = \frac{8\pi^2 d_{\text{eff}}^2}{\lambda_s \lambda_i n_p n_s n_i \varepsilon_0 c}, \quad g_s = \frac{1}{1 + (w_s/w_p)^2}, \quad I_p = \frac{1}{2} n c \varepsilon_0 |E_p|^2, \quad \varphi_p = \frac{\varepsilon_0 n_p^2 |E_p|^2}{4\hbar \omega_p}, \quad (10)$$

最终得到单谐振 IOPO 的有效转换截面的表达式为

$$\sigma_{\text{opo}} = 2\ell c \kappa g_s \hbar \omega_p / n_p = \frac{4\ell \hbar \omega_p \omega_s \omega_i d_{\text{eff}}^2}{\epsilon_0 n_s n_i n_p^2 c^2} \cdot \frac{w_p^2}{w_p^2 + w_s^2}. \quad (11)$$

### 3 数值分析

利用上述理论模型,结合四阶 Runge-Kutta 法,对单谐振 IOPO 的动力学过程及特性进行数值模拟。考虑 1.57  $\mu\text{m}$  人眼安全单谐振 IOPO 系统,其结构如图 1 所示。抽运源为 LD 端面抽运的 Nd:YVO<sub>4</sub>/Cr:YAG 被动调 Q 激光器,非线性光学材料为非临界相位匹配的 KTP 晶体,反射镜 M<sub>1</sub>(平凹输入镜,曲率半径为 50 mm)和 M<sub>3</sub>(平面输出镜)构成被动调 Q 抽运激光的谐振腔,M<sub>2</sub>(OPO 平面输入镜)和 M<sub>3</sub>构成 OPO 谐振腔。数值模拟过程中所使用的主要参数如下:  $l_c=5\text{ mm}$ ,  $l_n=20\text{ mm}$ ,  $l_s=3\text{ mm}$ ,  $l_p=58\text{ mm}$ ,  $R_p=0.998$ ,  $R_s=0.7\sim 0.9$ ,  $L_p=0.05$ ,  $L_s=0.02$ ,  $\lambda_p=1.06\ \mu\text{m}$ ,  $\lambda_s=1.57\ \mu\text{m}$ ,  $d_{\text{eff}}=3.4\ \text{pm/V}$ ,  $w_p=78\ \mu\text{m}$ ,  $w_s=55\ \mu\text{m}$ ,  $\sigma_p=25\times 10^{-23}\ \text{cm}^2$ ,  $\sigma_{\text{gs}}=7\times 10^{-18}\ \text{cm}^2$ ,  $\sigma_{\text{opo}}=1.06\times 10^{-16}\ \text{cm}^2$ 。

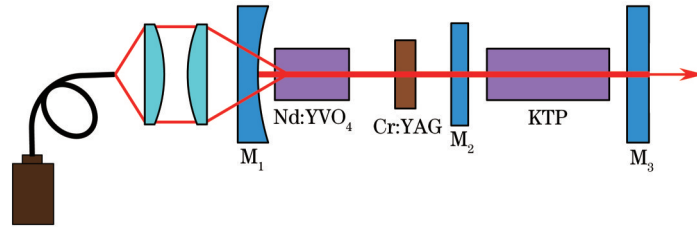


图 1 LD 抽运被动调 Q 单谐振 KTP-IOPO 的结构图

Fig.1 Schematic configuration of the LD pumped passively Q-switched single resonant KTP-IOPO

图 2 是在  $R_s$  值分别为 0.6、0.7、0.8、0.9 的情况下,模拟得到的激活介质内的粒子数反转以及抽运光和信号光脉冲随时间的变化曲线。从图中可以看出,信号光脉冲的建立总是比基频光脉冲的建立要延迟一段时间,并且这种延迟随着  $R_s$  的增加逐步减小。该现象充分说明,IOPO 的运转具有典型的阈值特性,故在 IOPO 起振之前,信号光并不能影响到抽运光脉冲的建立。当抽运脉冲能量达到 IOPO 阈值点的时候,信号光脉冲开始建立。但是,在初始阶段信号光脉冲对抽运脉冲的影响是可以忽略不计的,直到前者的能量足够高的时候才使得后者的能量迅速地减小。在第一个信号光脉冲建立之后,激活介质内还有足够的增益使基频光脉冲获得一定的放大。然而,由于此时所建立的基频光能量非常微弱,它不足以达到 OPO 的阈值水平而产

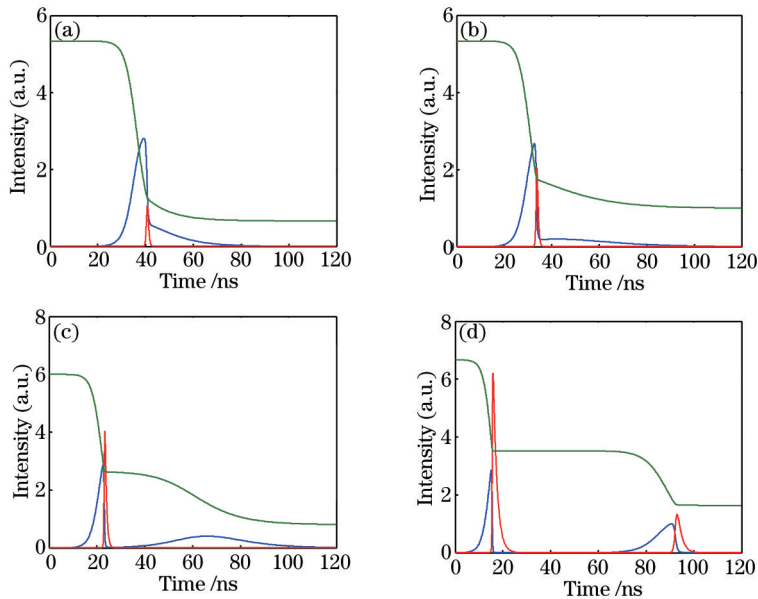


图 2 信号光反射率对反转粒子数、抽运光脉冲和信号光脉冲的影响。(a)  $R_s=0.6$ ; (b)  $R_s=0.7$ ; (c)  $R_s=0.8$ ; (d)  $R_s=0.9$

Fig.2 Impacts of the signal reflectivities on the population inversion, pump pulses and signal pulses.

(a)  $R_s=0.6$ ; (b)  $R_s=0.7$ ; (c)  $R_s=0.8$ ; (d)  $R_s=0.9$

生另一个信号光脉冲。但当  $R_s$  值增加到 0.9 的时候,如图 2(d)所示,第一次粒子数反转之后所剩余的能量超过了 IOPO 的阈值,因此在信号光主脉冲的一侧产生了一个伴峰,其能量要比主峰小许多。如果  $R_s$  值继续增加,那么这种弛豫现象就会持续进行下去,结果会产生第三个乃至多个小能量的信号光脉冲,这就是 IOPO 典型的、被广泛报道的多脉冲现象<sup>[12,14]</sup>。抽运光脉冲所能提供的能量非均匀性地分布在多个脉冲之间,会影响到信号光的输出单脉冲能量,所以多脉冲现象必须采取措施加以避免。

图 3 为  $R_s$  对信号光脉冲输出性能的影响。由图可知,当  $R_s$  值由 0.7 增加到 0.9 的时候,信号光脉冲的建立时间逐步提前,脉冲宽度逐渐增大。脉冲建立时间提前主要是因为  $R_s$  的增加使得 IOPO 阈值降低。信号光脉宽主要取决于信号光脉冲建立的初始时刻所对应的腔内抽运光功率密度大小,该功率密度越大信号光脉宽越窄,反之越宽。 $R_s$  的增加及信号光脉冲的超前建立,使信号光脉冲所能获取的抽运光能量降低,从而导致信号光脉宽加宽。由模拟结果可知,要实现 IOPO 单脉冲、窄脉宽运转,必须对耦合输出镜的信号光反射率进行优化,通常  $R_s$  的最优值取为 0.85。

另外,通过数值模拟发现,IOPO 信号光脉冲要比抽运光脉冲窄许多倍,即存在脉宽压缩现象。根据 Debuisschert 的 IOPO 理论,信号光脉冲宽度与 OPO 腔内信号光子的驻腔寿命相当,且有:

$$\tau_j = \frac{2L_j}{c[\ln(1/R_j) + \delta_j]}, \quad (12)$$

式中  $j=s, p$  分别代表信号光和抽运光,  $L_j$  为光学腔长,  $c$  为光速,  $R_j$  为输出镜反射率,  $\delta_j$  代表光损耗。对于 IOPO,有  $R_p > R_s$  以及  $L_p > L_s$ ,故由(12)式可得  $\tau_s < \tau_p$ ,进而可知信号光脉宽小于抽运光脉宽。由于信号光脉宽与抽运光子寿命无关,所以即使用较长的抽运脉宽,经过长时间的储能,也可以获得非常窄的信号光脉冲输出。因此,脉宽压缩机制使得 IOPO 有利于获得高峰值功率、高转换效率的参量光输出。

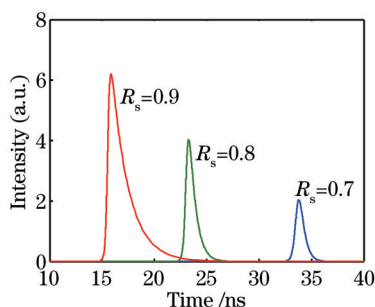


图 3 信号光反射率对信号光脉冲输出特性的影响

Fig.3 Impacts of the signal reflectivities on the output properties of the signal pulses

IOPO 腔内光子数密度及晶体粒子数密度随时间的变化,即 IOPO 动力学过程,如图 4 所示。从中可以概括出 IOPO 参量转换过程的 3 个主要阶段:1) 激活介质由于受到外界抽运而储存了大量的能量,饱和吸收体也由于对抽运光子的吸收而存储了一定的能量,此时由于谐振腔处于低  $Q$  值状态,所以腔内既无抽运光场更无信号光场;2) 随着时间的推移,饱和吸收体基态的粒子数逐渐减少,直至为零,说明随着基态粒子数的耗尽,饱和吸收体的基态吸收达到饱和,与此同时,抽运光脉冲开始从噪声中建立起来,激活介质内储存的能量开始向基频光场转换;3) 抽运光功率密度达到 IOPO 的起振阈值,信号光脉冲开始建立,能量又开始向信号光场转换。另外,从图 4 中还可以发现,饱和吸收体基态的吸收饱和发生在激活介质增益饱和之前,这恰好保障了被动调  $Q$  有效运转所必须的二次阈值条件。

为了验证所建立的 IOPO 理论模型的正确性,将数值模拟结果与实验结果进行了比较,如图 5 所示,实验结构同图 1 所示结构,实验参数同数值模拟所用参数。实验过程中,先用棱镜将 1064 nm 抽运光和 1573 nm 信号光分开,然后分别利用快速响应的 Si 和 InGaAs 光电二极管探测同步输出的脉冲,并利用带宽为 500 MHz 的存储示波器记录数据。由图可见,模拟结果和实验结果吻合的非常好。



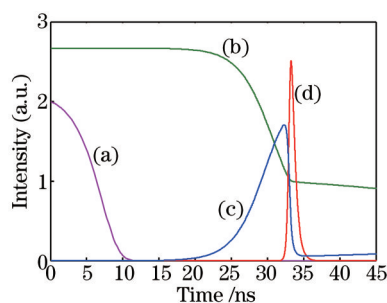


图4 被动调Q单谐振IOPO运转的动力学过程 ( $R_s=0.8$ )。 (a) 饱和吸收体基态粒子数密度; (b) 激光晶体内反转粒子数密度; (c) 抽运光脉冲; (d) 信号光脉冲

Fig.4 Dynamical buildup process of the signal pulses from the passively  $Q$ -switched signal resonant IOPO with  $R_s=0.8$ . (a) Absorber ground state population intensity; (b) population inversion in the laser crystal; (c) pump pulse; (d) signal pulse

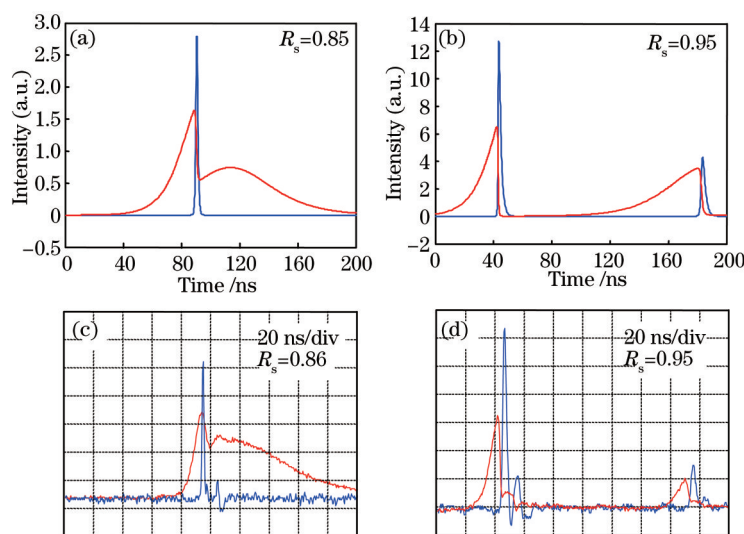


图5 被动调Q单谐振IOPO模拟结果与实验结果的比较。(a)、(b)为模拟结果; (c)、(d)为实验结果  
Fig.5 Comparison between simulated results and experimental results of the passively  $Q$ -switched single resonant IOPO. (a), (b): Simulated results; (c), (d) experimental results

## 4 结 论

在被动调Q四能级激光器速率方程的基础上,建立了一种较为简单的被动调Q单谐振IOPO的理论模型,提出OPO有效转换截面的概念。从三波相互作用的耦合波方程出发,推导出考虑晶体吸收、走离效应、抽运光和信号光模式匹配等参数的IOPO增益表达式,并进一步推导OPO有效转换截面的表达式。利用Runge-Kutta法对上述理论模型进行数值求解。研究表明:1) OPO有效转换截面是一个由非线性晶体品质及抽运光和信号光模式匹配共同决定的参数;2) IOPO表现出明显的阈值特性及脉宽压缩特性;3) 为获得窄脉宽、高峰值功率的参量光输出,耦合输出镜的信号光反射率存在一个最优值为0.85。调Q运转IOPO动力学过程非常复杂,影响因素较多。该理论模型的提出,对理解IOPO的动力学特性及IOPO的优化设计具有一定的理论指导意义。

## 参 考 文 献

- 1 Mirov S, Fedorov V, Moskalev I, *et al.*. Progress in  $\text{Cr}^{2+}$  and  $\text{Fe}^{2+}$  doped mid-IR laser materials[J]. Laser & Photonics Reviews, 2010, 4(1): 21-41.
  - 2 Ding Xin, Shang Ce, Sheng Quan, *et al.*. Continuous-wave tunable intracavity single resonance optical parametric oscillator under 880 nm in-band pumping and the inverse conversion[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(6): 0602008.
- 丁 欣,尚 策,盛 泉,等. 880 nm 共振抽运连续波内腔单谐振光学参量振荡器及其逆转换[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0602008.

- 3 Jiao B, Tian J R, Zhang X P, *et al.*. Multi-wavelength generation by intra-cavity frequency doubling of PPKTP optical parametric oscillator[J]. *Chin Opt Lett*, 2013, 11(s2): S21901.
- 4 Marshall L R, Hays A D, Kasinski J, *et al.*. Highly efficient optical parametric oscillators[J]. *Proceeding of SPIE-The International for Optical Engineering*, 1991, 1419: 141-152.
- 5 Miao J G, Pan Y Z, Qu S L. Comparison of small-scale actively and passively *Q*-switched eye-safe intracavity optical parametric oscillators at 1.57  $\mu\text{m}$ [J]. *Chin Phys Lett*, 2012, 29(7): 74201.
- 6 Duan Y, Zhu H, Ye Y, *et al.*. Efficient RTP-based OPO intracavity pumped by an acousto-optic *Q*-switched Nd:YVO<sub>4</sub> laser[J]. *Opt Lett*, 2014, 39(5): 1314-1317.
- 7 Li Peng, Ma Yayun, Nie Dandan, *et al.*. Continuous-wave single-frequency 1.5  $\mu\text{m}$  laser generated by a single resonant optical parametric oscillator[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(8): 0802008.  
李 鹏, 马亚云, 聂丹丹, 等. 利用单共振光学参量振荡器产生 1.5  $\mu\text{m}$  连续单频激光[J]. *中国激光*, 2014, 41(8): 0802008.
- 8 Yao Wenming, Tan Huiming, Wang Fan, *et al.*. Extra-cavity all-solid-state continuous wave optical parametric oscillator and stimulated Raman scattering in PPMgLN[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(12): 1202008.  
姚文明, 檀慧明, 王 帆, 等. 外腔全固态连续波 PPMgLN 光学参量振荡器与受激拉曼散射[J]. *中国激光*, 2012, 39(12): 1202008.
- 9 Miao J, Wang B, Peng J, *et al.*. Highly stable and efficient KTP-based intracavity optical parametric oscillator with a diode-pumped passively *Q*-switched laser[J]. *Appl Phys B*, 2007, 88(2): 193-196.
- 10 Oshman M K, Harris S E. Theory of optical parametric oscillation internal to the laser cavity[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1968, 4(8): 491-502.
- 11 Debuisschert T, Raffy J, Pocholle J P, *et al.*. Intracavity optical parametric oscillator: study of the dynamics in pulsed regime[J]. *J Opt Soc Am B*, 1996, 13(7): 1569-1587.
- 12 Dabu R, Fenic C, Stratan A. Intracavity pumped nanosecond optical parametric oscillator emitting in the eye-safe range[J]. *Appl Opt*, 2001, 40(24): 4334-4340.
- 13 Xiao G, Bass M, Acharekar M. Passively *Q*-switched solid-state lasers with intracavity optical parametric oscillators[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1998, 34(11): 2241-2245.
- 14 Chen Y F, Chen S W, Tsai S W, *et al.*. Output optimization of a high-repetition-rate diode-pumped *Q*-switched intracavity optical parametric oscillator at 1.57  $\mu\text{m}$ [J]. *Appl Phys B*, 2003, 77(5): 505-508.
- 15 Xiao G, Bass M. A generalized model for passively *Q*-switched lasers including excited state absorption in the saturable absorber[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1997, 33(1): 41-44.
- 16 Lan Xinju. *Laser Technology*[M]. Beijing: Science Press, 2009: 265-268.  
蓝信钜. *激光技术*[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 265-268.

栏目编辑: 张浩佳