

## 附加反馈腔对光学参量振荡腔特性的改善\*

张云 苏红 王海 潘庆

(山西大学光电研究所, 太原, 030006)

**摘要** 本文提出一种通过附加反馈腔减小由于OPO腔镜反射不完全带来的损耗的实验方案, 计算结果表明, 附加外腔使系统总损耗及振荡阈值降低, 在不改变输出耦合镜透射率的情况下, 可以增大输出耦合效率, 提高输出场的强度差压缩度。

**关键词** 光学参量腔, 阈值, 强度差压缩

**中图法分类号** O431

### 0 引言

光学参量振荡腔(Optical Parametric Oscillator 简称OPO)发展至今已有近三十年的历史, 由于其宽的调谐特性, 引起人们广泛关注, 近十年, 随着稳定泵浦源、优质非线性晶体的出现, 以及镀膜及锁模技术的进一步提高, 使得OPO能稳定运转并且进行频率调谐。此外, OPO已在超高精密测量、高分辨率光谱、QND测量等方面显示出极其重要的应用前景<sup>[1][2]</sup>。因而, 光学参量振荡腔是非线性光学和量子光学中最常用的装置。特别是在光场压缩态产生实验中, OPO腔能在运转于阈值以下产生正交相位压缩<sup>[3~5]</sup>, 运转于阈值以上产生高强度量子相关孪生光子对<sup>[6][7]</sup>。所得光场压缩度高于其它非线性光学系统, 是迄今为止获取非经典光场的最佳实验手段。

光学参量振荡腔的额外损耗直接影响着腔的各种特性, 如阈值、转换效率、输出场的噪声等<sup>[8]</sup>, 因此实验上力求降低OPO的总损耗, 以提高输出耦合效率。虽然采用半整块(semi-monolithic)及整块(monolithic)结构可以最大限度地减小损耗, 然而由于镀膜技术的限制使得镜面反射不完全带来的损耗还无法彻底消除。本文提出一种通过外腔反馈弥补镜面反射

\* 国家自然科学基金和山西省自然科学基金资助项目

收稿日期: 1998-06-08

不完全的实验方案。计算结果表明,在不改变输出耦合镜透射率的情况下,可以降低腔的振荡阈值,增加内腔功率密度,提高输出耦合效率及增大输出场强度差噪声压缩度。

## 1 理论分析

### 1.1 基本模型

考虑如图 1 所示的光学系统。二阶非线性晶体置于由腔镜  $M_1$ 、 $M_2$  和  $M_5$  组成的环形腔中,  $M_1$  兼作输入输出耦合镜,  $M_2$ 、 $M_5$  为全反镜。为简单起见,仅考虑由于  $M_2$  不完善所造成的影响,  $M_5$  为理想全反镜,其损耗可归并在内腔其它损耗中。  $M_2$ 、 $M_3$  和  $M_4$  构成 OPO 的附加外腔,对  $M_2$  的漏出光形成光学反馈。虽然实际上  $M_3$  与  $M_4$  均不可能

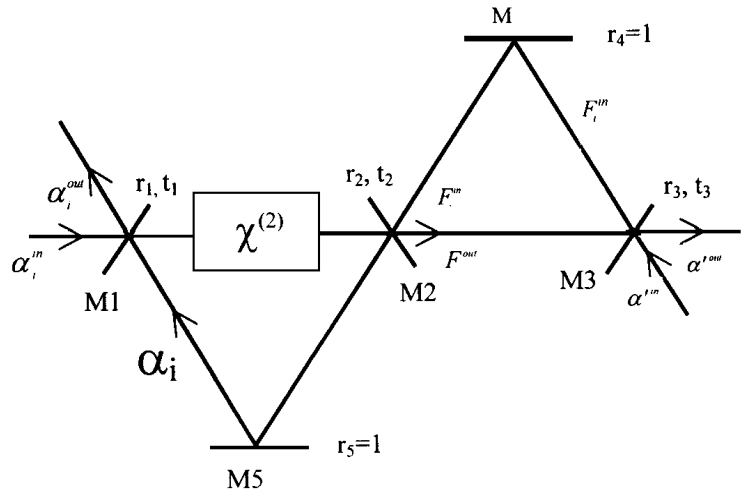


图 1 带外腔的光学参量振荡腔

为完善的全反镜,计算中我们将  $M_4$  的损耗归并于  $M_3$  中,认为  $M_4$  不引入额外损耗。设  $\alpha_i^in, \alpha_i^out$  是输入与输出信号场,  $\alpha_i^in, \alpha_i^out$  是由于  $M_2$  和  $M_3$  反射不完全而引入的输入输出场,无源情况下,  $\alpha_i^in$  为真空噪声。如果我们考虑一非简并参量转换过程,腔内三模频率分别为  $\omega, \omega_1, \omega_2$  ( $\omega = \omega_1 + \omega_2$ )。在考虑腔损耗、腔失谐以及同时存在外腔信号场,闲置场和泵浦场的情况下,内腔三个场模  $\alpha_i$  ( $i = 0, 1, 2$ , 其中  $\alpha_0$  为泵浦场,  $\alpha_1, \alpha_2$  分别为信号场和闲置场)的时间演化方程为<sup>[8]</sup>:

$$\tau_0 \frac{d}{dt} \alpha_0 = - (\gamma_0 + \gamma_0 + \mu_0 + i\delta_0) \alpha_0 - g \alpha_1 \alpha_2 + \sqrt{2\gamma_0} \alpha_0^{in} + t_2 F_0^{in} + \sqrt{2\mu_0} \beta_0^{in} \quad (1)$$

$$\tau_1 \frac{d}{dt} \alpha_1 = - (\gamma_1 + \gamma_1 + \mu_1 + i\delta_1) \alpha_1 + g \alpha_0 \alpha_2^* + \sqrt{2\gamma_1} \alpha_1^{in} + t_2 F_1^{in} + \sqrt{2\mu_1} \beta_1^{in} \quad (2)$$

$$\tau_2 \frac{d}{dt} \alpha_2 = - (\gamma_2 + \gamma_2 + \mu_2 + i\delta_2) \alpha_2 + g \alpha_0 \alpha_1^* + \sqrt{2\gamma_2} \alpha_2^{in} + t_2 F_2^{in} + \sqrt{2\mu_2} \beta_2^{in} \quad (3)$$

其中  $\tau_i$  ( $i = 0, 1, 2$ ) 是第  $i$  模在腔中往返一周所用的时间,  $\delta_i$  为腔的失谐量,  $\gamma_i$  是耦合镜带来

的损耗系数,  $\mathcal{Y}_i$  是腔镜反射不完全带来的损耗系数,  $\mu_i$  为内腔其它损耗 ( $M_5$  反射不完全、散射、晶体吸收等) 系数,  $\beta_i^{in}$  为与内腔其它损耗机制相联系的真空输入场,  $F_i^{in}$  和  $F_i^{out}$  为  $M_2$  镜上入射与反射的泵浦、信号和闲置模 ( $i = 0, 1, 2$ )。

由能量守恒可知在  $M_2$  处有:

$$F_i^{out} = t_2 \alpha_i - r_2 F_i^{in} \quad (4)$$

考虑外腔共振, 若不考虑  $M_4$  的不完善性, 在  $M_3$  处有:

$$F_i^{in} = r_3 F_i^{out} + t_3 \alpha_i^{out} \quad (5)$$

$r_2, t_2; r_3, t_3$  分别是  $M_2, M_3$  对 3 振幅的反射与透射系数。我们假定  $r_i = 1$ , 有:

$$\begin{aligned} r_i &= 1 - \mathcal{Y}_i \\ t_i &= (2\mathcal{Y}_i)^{\frac{1}{2}} \end{aligned}$$

由 (4) (5) 式得:

$$F_i^{in} = \frac{r_3 t_2}{1 + r_2 r_3} \alpha_i + \frac{t_3}{1 + r_2 r_3} \alpha_i^{in} \quad (6)$$

将 (6) 式代入 (1) (2) (3) 得:

$$\begin{aligned} \tau_0 \frac{d}{dt} \alpha_0 &= - \left[ \mathcal{Y}_0 + \mathcal{Y}_0 + \mu_0 + i\delta_1 - \frac{r_3 t_2^2}{1 + r_3 r_2} \right] \alpha_0 \\ &\quad - g \alpha_1 \alpha_0 + t_1 \alpha_0^{in} + \frac{t_2 t_3}{1 + r_2 r_3} \alpha_0^{in} + \sqrt{2\mu_0} \beta_0^{in} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \tau_1 \frac{d}{dt} \alpha_1 &= - \left[ \mathcal{Y}_1 + \mathcal{Y}_1 + \mu_1 + i\delta_1 - \frac{r_3 t_2^2}{1 + r_3 r_2} \right] \alpha_1 \\ &\quad + g \alpha_0 \alpha_1^* + t_1 \alpha_1^{in} + \frac{t_2 t_3}{1 + r_2 r_3} \alpha_1^{in} + \sqrt{2\mu_1} \beta_1^{in} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \tau_2 \frac{d}{dt} \alpha_2 &= - \left[ \mathcal{Y}_2 + \mathcal{Y}_2 + \mu_2 + i\delta_2 - \frac{r_3 t_2^2}{1 + r_3 r_2} \right] \alpha_2 \\ &\quad + g \alpha_0 \alpha_2^* + t_1 \alpha_2^{in} + \frac{t_2 t_3}{1 + r_2 r_3} \alpha_2^{in} + \sqrt{2\mu_2} \beta_2^{in} \end{aligned} \quad (9)$$

(7), (8), (9) 式即带外腔 OPO 内腔三模的演化方程, 同 (1) (2) (3) 相比, 总损耗项中多了  $\left[ -\frac{r_3 r_2^2}{1 + r_3 r_2} \right]$  项。这正是由于我们引用外腔后使总损耗降低, 在  $r_3 = 1$  时, 获得最佳反馈。如外腔不存在 ( $r_3 = 0, t_3 = 1$ ),  $F_i^{in} = \alpha_i^{in}, F_i^{out} = \alpha_i^{out}$ , 方程与文献[8] 所得内腔三模演化方程完全相同。当时  $t_3 = 1$  时,  $\frac{t_2 t_3}{1 + r_3 r_2} < t_2$ , 因而附加腔的存在, 使得  $\alpha_i^{in}$  的影响也相应减小。

我们在以下讨论中只考虑三模共振情况, 即  $\delta_0 = \delta_1 = \delta_2 = 0$

## 1.2 稳态解

方程(7), (8), (9)的稳态方程为:

$$0 = -\mathcal{Y}_0\alpha_0 - g\alpha_0\alpha_2 + t_1\alpha_0^{in} + \frac{t_2t_3}{1+r_2r_3}\alpha_0^{in} + \sqrt{2\mu_0}\beta_0^{in} \quad (10)$$

$$0 = -\mathcal{Y}_1\alpha_1 + g\alpha_0\alpha_2 + t_1\alpha_1^{in} + \frac{t_2t_3}{1+r_2r_3}\alpha_1^{in} + \sqrt{2\mu_1}\beta_1^{in} \quad (11)$$

$$0 = -\mathcal{Y}_2\alpha_2 + g\alpha_0\alpha_1 + t_1\alpha_2^{in} + \frac{t_2t_3}{1+r_2r_3}\alpha_2^{in} + \sqrt{2\mu_2}\beta_2^{in} \quad (12)$$

其中  $\mathcal{Y}_i = \mathcal{Y}_i + \mathcal{Y}_i + \mu_i - \frac{r_3t_2^2}{1+r_3r_2}$ , 一般情况下两模损耗平衡, 我们假定  $\mathcal{Y}_1 = \mathcal{Y}_2$ ,  $\alpha_1 = \alpha_2$ ,  $\alpha_i^{in} = \beta_i^{in} = 0$ , 得稳态解

$$\alpha_0 = \frac{\epsilon_0 - g\alpha_0^2}{\mathcal{Y}_0} = \frac{\mathcal{Y}_1}{g} - \frac{\epsilon_1}{g\alpha_0} \quad (13)$$

$$g^2\alpha_0^3 - (g\epsilon_0 - \mathcal{Y}_0\mathcal{Y}_0)\alpha_0 - \mathcal{Y}_0\epsilon_1 = 0 \quad (14)$$

其中  $\epsilon_0 = t_1\alpha_0^{in}$ ,  $\epsilon_1 = t_1\alpha_1^{in}$ , 若考虑没有信号场输入 ( $\alpha_0^{in} = \alpha_1^{in} = 0$ ) 的光学参量振荡腔, 得方程的稳态解:

$$\begin{cases} \alpha_0 = \frac{\epsilon_0}{\mathcal{Y}_0}, & \alpha_1 = \alpha_2 = 0, & \epsilon_0 < \epsilon_0^{thr} \\ \alpha_0 = \frac{\mathcal{Y}_1}{g}, & \alpha_1 = \alpha_2 = \sqrt{\frac{1}{g}(\epsilon_0 - \epsilon_0^{thr})}, & \epsilon_0 > \epsilon_0^{thr} \end{cases} \quad (15)$$

式中  $\epsilon_0^{thr} = \frac{\mathcal{Y}_0\mathcal{Y}_1}{g}$  为腔的振荡阈值,  $r_3$  愈大,  $\mathcal{Y}_i$  愈小振荡阈值愈低, 这表明附加腔的引入能使振荡阈值降低.

## 1.3 噪声谱

为考虑噪声影响, 将稳态解(15)代入方程(7)(8)(9)再加入微扰项, 一级近似的情况下得:

$$\tau_0\delta\alpha_0 + \mathcal{Y}_0\delta\alpha_0 = -g\alpha_0\delta\alpha_1 - g\alpha_1\delta\alpha_2 + t_1\delta\alpha_0^{in} + \frac{t_2t_3}{1+r_2r_3}\delta\alpha_0^{in} + \sqrt{2\mu_0}\delta\beta_0^{in} \quad (16)$$

$$\tau_1\delta\alpha_1 + \mathcal{Y}_1\delta\alpha_1 = \mathcal{Y}_1\delta\alpha_2 + g\alpha_0\delta\alpha_0 + t_1\delta\alpha_1^{in} + \frac{t_2t_3}{1+r_2r_3}\delta\alpha_1^{in} + \sqrt{2\mu_1}\delta\beta_1^{in} \quad (17)$$

$$\tau_2\delta\alpha_2 + \mathcal{Y}_1\delta\alpha_2 = \mathcal{Y}_1\delta\alpha_1 + g\alpha_1\delta\alpha_0 + t_1\delta\alpha_2^{in} + \frac{t_2t_3}{1+r_2r_3}\delta\alpha_2^{in} + \sqrt{2\mu_2}\delta\beta_2^{in} \quad (18)$$

运转于阈值以上的光学参量振荡腔, 输出的信号与闲置场具有很强的强度量子相关性,

其强度差起伏低于标准量子极限<sup>[6,7]</sup>,我们以计算输出信号与闲置场强度差起伏为例,说明附加腔对噪声的抑制作用。由

$$\alpha_i^{out} = t_1 \alpha_i - r_1 \alpha_i^{in} \tag{19}$$

可将内腔的起伏关系转换为输出场的起伏。输出信号场与闲置场强度差  $\delta I = I_1 - I_2$  的噪声谱可表示为<sup>[8]</sup>:

$$S_I(\omega) = S_0 \frac{4\mu \gamma + \omega^2 \tau^2}{4\gamma^2 + \omega^2 \tau^2} \tag{20}$$

其中  $S_0$  为散粒噪声基准,  $\mu = \mu_i + \gamma_i - \frac{r_3 t_2^2}{1 + r_2 r_3}$  为额外损耗,  $\omega$  为分析频率, 其归一化后输出场的压缩度为:

$$S(\omega) = \frac{\xi}{1 + \omega^2 \tau_c^2} \tag{21}$$

$\xi = \frac{\gamma}{\gamma_1}$  为输出耦合效率,  $\tau_c = \frac{\tau}{2\gamma_1}$  为腔的寿命, 由此看到, 引入外腔可以减小额外损耗, 增大输出耦合效率, 压窄腔带宽, 使输出场的压缩度在低频段得到较大改善。

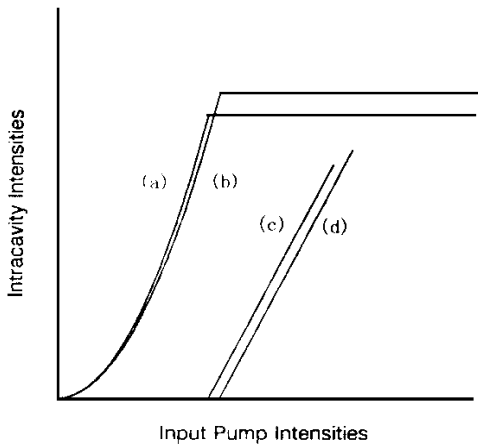


图2 内腔场与输入泵浦场的关系  
 曲线(a) 带外腔内腔泵浦场  
 曲线(b) 不带外腔内腔泵浦场  
 曲线(c) 带外腔内腔信号场  
 曲线(d) 不带外腔内腔信号场

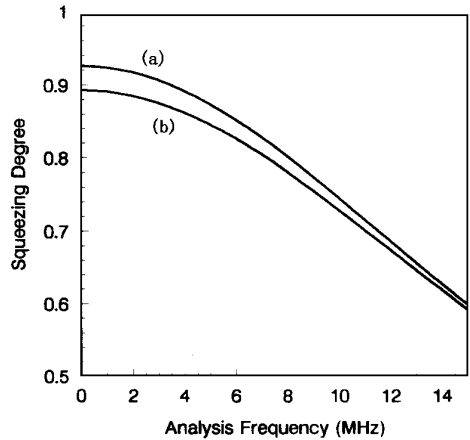


图3 输出场强度差压缩  
 曲线(a). 带外腔  
 曲线(b). 不带外腔

## 2 数值计算

以下通过数值计算举例说明带外腔OPO的特性。假定镜片对各模的反射及透射率相等,

选取 OPO 总腔长为 40cm, 输出耦合镜  $M_1$  的透射率为 5%,  $M_2, M_3$  为高反镜, 就目前的镀膜技术一般高反镜反射率在 99.8% 以上, 将  $M_5$  与  $M_4$  的损耗计及在内腔额外损耗中, 取  $\mu = 0.2\%$ , 得到不带外腔与带外腔的总损耗 ( $\gamma$ ) 分别为 0.028 与 0.027, 对应的输出耦合效率为 0.893 与 0.926。通过加外腔, 使总损耗降低 0.001, 输出耦合效率增加 0.033。图 (2a) 是从式 (15) 出发得到的内腔场功率度曲线, 其中 (a)、(b) 和 (c)、(d) 分别为带外腔与不带外腔时内腔泵浦场及信号场功率密度随输入泵浦场强度的变化曲线, 不难看出加外腔后振荡阈值明显减小, 且在相同泵浦条件下, 内腔信号场功率密度增大。图 (3) 是输出场的强度差压缩度随分析频率的变化曲线, 曲线 (a) 和 (b) 分别为带外腔与不带外腔时的计算结果, 由于加外腔反馈, 输出场的压缩度得到改善, 尤其在低频段提高较大。曲线 (b) 与文献 [8] 所得结果一致。我们选取输出耦合镜  $M_1$  的透射率为 1%, 其它条件不变得到其不带外腔与带外腔的总损耗 ( $\gamma$ ) 分别为 0.008 与 0.007, 对应的输出耦合效率为 0.625 与 0.714。通过加外腔, 使总损耗降低 0.001, 输出耦合效率增加 0.089。由此我们不难看出, 这一方案对输出耦合镜为低透射率时能大幅度提高输出耦合效率及输出场的压缩度。

### 3 结论及讨论

本文在考虑加外腔的情况下, 由三模作用的耦合波方程出发, 采用半经典理论分析了内腔损耗, 内腔功率密度及输出场的强度差压缩度, 计算结果说明加外腔方法可在一定程度上降低腔镜反射不完全引入的额外损耗, 从而降低 OPO 腔振荡阈值, 增大内腔功率密度和输出耦合效率, 提高输出场强度差压缩度。这对设计低损耗 OPO 腔具有重要意义。实际装置中  $M_5$  不可能为理想全反镜, 如果需要也可为  $M_5$  附加反馈腔。值得一提的是此方案在具体的实验中特别适用于非简并的情况: 在频率非简并时,  $M_2$  对两频率模的反射率要求很高, 这在镀膜技术中很难保证, 我们可以将  $M_2$  镀有对一种频率的高反膜,  $M_3, M_4$  镀有对另一频率的高反膜, 来达到我们两模同时有高的反射率的要求; 在偏振非简并的情况下我们可以将  $M_2$  镀以 S 偏振的全反膜, 而  $M_3, M_4$  镀有对 P 偏振的全反膜而达到两种偏振同时在腔中低损耗运转。另外, 在此基础上, 我们可以通过对  $M_2$  对不同波长反射率的选取, 设计有利于 OPO 腔稳定运转的泵浦与信号分别在两腔共振的 OPO 腔。

### 参考文献

- 1 王海, 潘庆, 张云等. 低于散粒噪声极限的微小吸收测量. 中国科学, 1998, 28(4): 342~ 347
- 2 Bruckmayer R, Schneider K, Hansen H, Schacke M, Schiller S, Mlynec J. Continuous-wave quantum

- nondemolition measurements with vacuum and nonclassical meter input *Applied Physics B*, 1997, **64**: 203~ 212
- 3 Wu L A, Kimble H J, Hall J L, Wu H. Generation of squeezing states by parametric conversion *Phys Rev. Lett* 1986, **57**(20): 2520~ 2523
- 4 Breiterbach G, Muller T et al Squeezed vacuum from a monolithic optical parametric oscillator *Journal of Optical Society of America B*, 1995, **12**(11): 2304~ 2309
- 5 彭 辉, 黄茂全, 刘晶等 双模光场压缩态的实验研究 *物理学报*, 1993, **42**(7): 1079~ 1085
- 6 Mertz J, Debuisschert T, Heidmann A et al Improvements in the observed intensity correlation of optical parametric oscillator twin beams *Opt Lett*, 1991, **16**(16): 1234~ 1236
- 7 潘庆, 张云, 张天才等 1.08 $\mu\text{m}$  波长低阈值高效率强度差压缩光产生的实验研究 *中国激光*, 1997, **24**(7): 631~ 634
- 8 Fabre C, Giacobino E, Heidmann A, Reynaud S. Noise characteristics of a nondegenerate optical parametric oscillator *J. Phys* 1989, **50**: 1209~ 1225

## Improvements on the Characteristics of Optical Parametric Oscillator with Extra Feedback Cavity

Zhang Yun Su Hong Wang Hai Pan Qing

(Institute of Opto-electronics of Shanxi University, Taiyuan, 030006)

### Abstract

We proposed an experimental method to reduce losses due to imperfection of cavity mirrors of optical parametric oscillator (OPO) by means of an extra feedback cavity. The calculation results show that with an extra feedback cavity the losses and oscillation threshold of OPO are decreased, the output coupling efficiency and intensity difference squeezing are improved even without change of the transmission of output coupler.

**Keywords** Optical Parametric Oscillator, threshold, Intensity difference squeezing

### 第一作者简介

张云, 男, 1971年5月出生, 博士生, 主要从事量子光学, 激光技术等方面的研究工作。