

非简并光学参量振荡腔的经典增益*

刘晶 张天才 廉毅敏 于辰 谢常德 彭堃墀

(山西大学光电所, 太原 030006)

于正刚 蒋德华

(山东大学化学院, 济南 250100)

提 要

采用双晶体串接, 温度调谐及光楔补偿方法, 实现了参量振荡腔内泵浦场与非简并亚谐波场之间的三模同时共振, 测定了系统的经典增益, 实验结果与半径典理论计算符合.

关键词 光学参量振荡腔, 三模共振, 经典增益.

1 引 言

采用光学参量振荡腔实现参量下转换是获得光场压缩态的重要途径之一. 利用温度匹配的 $\text{MgO} : \text{LiNbO}_3$ 晶体实现简并参量下转换已获得噪声水平较真空水平下降近 70% 的单模压缩光场^[1]. 采用晶体的 I 类匹配过程完成的非简并(频率简并, 偏振非简并)参量下转换可获得双模压缩态光场. 实验的关键在于最大可能地提高参量转换效率, 因而应使光学参量振荡腔运转于最佳状态. 在双模压缩真空态产生实验中, 光学参量振荡腔工作在亚谐波模振荡阈值之下, 故难以监视内腔三模相互作用过程, 为此通过测定光学参量振荡腔的经典增益来判定内腔转换效率. 本文对非简并双 KTP 晶体参量下转换过程的经典增益进行了理论和实验研究, 用环行稳频倍频 Nd : YAG 激光器输出的 $0.53 \mu\text{m}$ 绿光作为泵浦光源, 采用双晶体串接以实现腔内三模共振, 获得了在运转条件下的最大增益, 理论分析与实验结果符合.

2 实验装置

图 1 为实验装置, 其中光学参量振荡腔为实验的核心部分. 光学参量振荡腔由曲率半径分别为 100 mm, 50 mm 的凹面镜 M, M' 和 KTP 晶体组成, 腔长 150 mm, 为共心腔结构, 每个尺寸为 $3\text{mm} \times 3\text{mm} \times 5.6\text{ mm}$ 的双晶体置于腔共心处并被放在精密控温炉内. 波长为 $0.53 \mu\text{m}$ 泵浦光射入光学参量振荡腔中, 通过非简并参量下转换产生一对波长为 $1.06 \mu\text{m}$, 偏振正交的亚谐波光场, 前镜 M 对 $1.06 \mu\text{m}$ 红外光反射率大于 99%, 对 $0.53 \mu\text{m}$ 反射率为 97%, 后镜 M' 对 $1.06 \mu\text{m}$ 反射率为 94% 和 97% 两组数据, 对 $0.53 \mu\text{m}$ 绿光反射率大于 99%, 双晶体对 $1.06 \mu\text{m}$ 和 $0.53 \mu\text{m}$ 镀增透膜.

收稿日期: 1992 年 7 月 3 日; 收到修改稿日期: 1992 年 10 月 28 日

* 国家自然科学基金资助的项目, 山西省自然科学基金资助的项目.

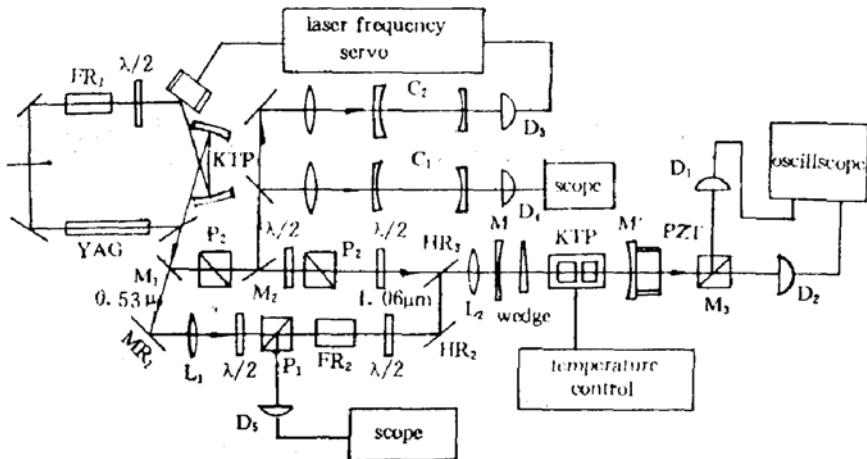


Fig. 1 Experimental setup. The OPO cavity formed by the mirror of M, M' , two KTP crystals and optical wedge. M —high reflectivity at $1.06 \mu\text{m}$ and 97% at $0.53 \mu\text{m}$, M' —high reflectivity at $0.53 \mu\text{m}$ and 94%、97% at $1.06 \mu\text{m}$ respectively. The reference cavity C_2 used to stabilize laser frequency. The cavity C_1 used to monitor laser frequency, M_1 —HR at $1.06 \mu\text{m}$ and AR at $0.53 \mu\text{m}$, M_2 —50/50 splitter at $1.06 \mu\text{m}$, polarizer— P_1, P_2, P_3 and M_3 . Faraday rotator— FR_1, FR_2 , lenses $L_1=250 \text{ mm}$, $L_2=200 \text{ mm}$. D_1, D_2 used to detect $0.53 \mu\text{m}$ and $1.06 \mu\text{m}$ respectively.

从环形稳频倍频 Nd : YAG 激光器输出的单模绿光($0.53 \mu\text{m}$)和红外光($1.06 \mu\text{m}$)经分色镜 M_1 分成两束, 绿光经全反镜 HR_1 , 匹配透镜 L_1, L_2 , $\frac{1}{2}$ 波片, 光隔离系统(由法拉弟旋转器 FR_2 和起偏器 P_1 组成)进入光学参量振荡腔, M' 上装有压电陶瓷用于腔长扫描, 用全反镜 HR_2, HR_3 校准泵浦入射光方向. 另一束红外光经 M_1 反射, 通过起偏器 P_2 后被分束镜 M_2 分为两束, 其中之一进入 C_1, C_2 共焦腔, 用于监视激光器模式和激光器频率锁定. 从 M_2 透射的红外光经 $\frac{1}{2}$ 波片, 起偏器 P_3 , 在 HR_3 处与绿光重合. 红外光是作为信号光场输入光学参量振荡腔的, 从光学参量振荡腔输出的红外光与绿光被偏振镜 M_3 分开, 分别送入红外光和绿光探测器 D_1 和 D_2 , 并通过双线示波器观察双光波透射场.

3 实验结果和理论分析

3.1 三模共振

将绿光泵浦场(功率为 40 mW)和红外信号场(功率为 5 mW)同时注入光学参量振荡腔, 调整腔前高反镜及光路中匹配透镜, 使红外和绿光光场与光学参量振荡腔分别达到完全模匹配, 即光学参量振荡腔输出场为单纵模. 使双 KTP 晶体按一定方位串接以避免非简并亚谐波模之间的离散效应^[2,3]. 在腔长扫描的情况下, 旋转腔前红外光 $\frac{1}{2}$ 波片, 使入射红外光偏振方向与晶体 XY 平面成 45° , 可观察到与晶体中 e_1, e_2 两个红外偏振模相对应的共振峰. 将泵浦场绿光偏振方向旋转至与晶体 XY 平面平行, 则绿光线偏振模也在腔内振荡. 图 2 为红外光二个偏振模和绿光泵浦模不同时起振时所记录的输出场. 上轨迹中双峰与二个红外模对应, 下轨迹相应于泵浦模. 调节晶体温度, 当达到一定值时, 红外光双模在腔内光程差为 $\frac{1}{2}$ 波长整数倍, 双模重合. 同时, 在光学参量振荡腔内再插入镀有双波长增透膜的光楔, 调整方位, 以补偿泵浦光与红外之间的光程差, 使绿光和红外光同时共振, 即达到三模同时共振状态, 如图 3 所示. 实验表明, 这种插入光楔以补偿绿光和红外光程差实现三模共振的方法比通常所用的腔内充气体, 并控制气压的补偿方法更为方便和稳定. 对不同反射率的两组输出镜($R=94\%$ 和 97%)分别测

得光学参量振荡腔对红外光与绿光的精细度为 70,70 和 90,70.

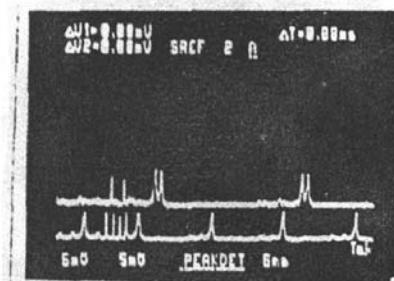


Fig. 2 The output field from OPO cavity when the length is scanned. The upper trace is the resonance of two nondegenerate modes at $1.06 \mu\text{m}$. The lower trace is the pump modes ($0.53 \mu\text{m}$) resonating

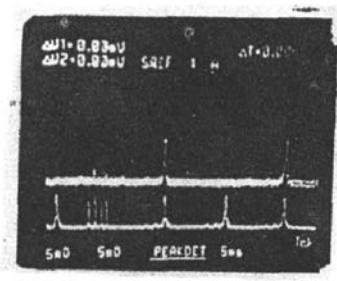


Fig. 3 Simultaneous resonance of the three modes for pump mode at $0.53 \mu\text{m}$ (lower trace) and two nondegenerate modes at $1.06 \mu\text{m}$ (upper trace)

3.2 红外光的经典增益

控制晶体温度,使光学参量振荡腔工作在三模同时共振状态,因入射绿光功率低于光学参量振荡腔亚谐波模的振荡泵浦阈值,当无红外信号光输入时,也无红外输出场.若注入红外信号场,光学参量振荡腔起参量放大器作用,红外光在绿光泵浦场作用下产生经典增益,同时输出红外光场.当光学参量振荡腔在阈值之下运转时,只有通过获得红外光场的经典增益来判定其转换效率.扫描入射信号红外光初位相,可观察到红外光的经典增益随两波场入射位相差的改变而起伏,最大增益与最佳转换状态相对应.图 4、图 5 分别记录了低精细度腔(70, 70)在泵浦功率为 30 mW, 40 mW 两种情况下的经典增益,其实验值为 1.5 和 2. 图 4 和图 6 比较了在同样泵浦水平 30 mW 下,低精细度与高精细度(90, 70)两组光学参量振荡腔的经典增益,其实验值分别为 1.5 和 2.2. 图 4(a)对应于无泵浦绿光(下轨迹)而仅有红外光注入的情况,图 4(b)为两波场入射位相一致时,红外光的经典增益达最大值.从图中明显看出高精细度腔的经典增益增高.泵浦功率越高,增益越大.

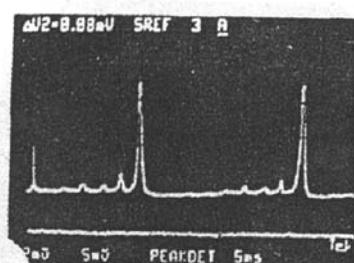


Fig. 4(a) The output field at $1.06 \mu\text{m}$ (upper trace) from OPO without input pump green (lower trace). The OPO finesse: 70 at $1.06 \mu\text{m}$ 70 at $0.53 \mu\text{m}$

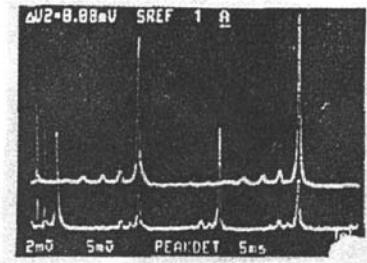


Fig. 4(b) The classical gain of $1.06 \mu\text{m}$ $G = 1.5$ compared with Fig. 4 (a) (upper trace, the right peak) when input green power is 30 mW (lower trace)



Fig. 5 (a) The output field at 1.06 μm (upper trace) from OPO without input pump green (lower trace). The OPO finesse: 70 at 1.06 μm, 70 at 0.53 μm

Fig. 5 (b) The classical gain of 1.06 μm $G = 2$ compared with Fig. 5 (a) (upper trace, the left peak) when input green power is 40 mW (lower trace)

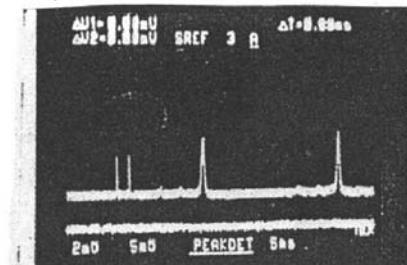


Fig. 6(a) output field at 1.06 μm (upper trace) from OPO without input pump green (lower trace). The OPO finesse: 90 at 1.06 μm 70 at 0.53 μm

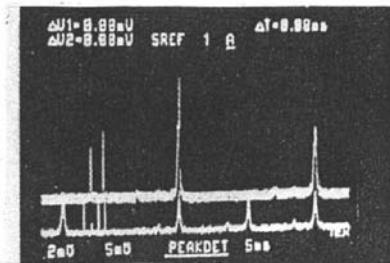


Fig. 6(b) The classical gain of 1.06 μm $G = 2.2$ compared with Fig. 6(a) (upper trace, left peak) when input green power is 30 mW (lower trace)

3.3 理论分析

近似认为偏振非简并,频率简并的两个亚谐波模在光学参量振荡腔中损耗相同,在做简并情形处理时,光学参量振荡腔相互作用的半经典方程为^[4]

$$\dot{\alpha}_1 = -i\Delta_1\alpha_1 - \Gamma_1\alpha_1 + K\alpha_1^*\alpha_2 + \varepsilon_1, \quad \dot{\alpha}_2 = -i\Delta_2\alpha_2 - \Gamma_2\alpha_2 - (\frac{1}{2}K)\alpha_1^2 + \varepsilon_2 \quad (1)$$

其中 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 为信号和泵浦相干驱动场, α_1, α_2 为腔内亚谐波和泵浦场振幅, Γ_1, Γ_2 为内腔场的衰减速率, $\Delta_1 = \omega_1 - \omega$, $\Delta_2 = \omega_2 - 2\omega$ 为腔内失谐量, ω_1, ω_2 分别为亚谐波场和泵浦场频率, 耦合系数 K 正比于腔内晶体二阶非线性系数 $\chi^{(2)}$, 在 $\Delta_1 = \Delta_2 = 0$ 情形下, 方程(1) 的稳态解 α_1^0, α_2^0 为:

$$\alpha_1^0 = \frac{1}{\Gamma_1}(\varepsilon_1 + K\alpha_1^0\alpha_2^0), \quad \alpha_2^0 = \frac{1}{\Gamma_2}\left[\varepsilon_2 - \frac{K}{2}(\alpha_1^0)^2\right] \quad (2)$$

当 $\varepsilon_2 < \varepsilon_2^c = \Gamma_1\Gamma_2/K$, 且 $\varepsilon_1 = 0$ 时, $\alpha_1^0 = 0$, 其中 $\varepsilon_2^c = \Gamma_1\Gamma_2/K$ 为泵浦场阈值. 上式说明当泵浦场小于阈值且无信号场输入时, 无亚谐波场输出. 当有注入信号时, α_1^0 不等于零, 产生亚谐波场, 此时分别用 $\varepsilon_1 = E_1 e^{i\phi_0}$ 和 $\alpha_1^0 = r e^{i\phi}$ 表示注入信号与内腔亚谐波光场, 其中 E_1, r, ϕ_0 和 ϕ 为它们相应的振幅与位相因子, 并取泵浦场相因子为零, 代入方程(2)得:

$$r^3 - \left(\frac{2E_2}{K}\right)r \cos 2\phi + \left(\frac{2\Gamma_1\Gamma_2}{K^2}\right)r - \left(\frac{2E_1\Gamma_2}{K^2}\right)\cos(\phi + \phi_0) = 0 \quad (3)$$

$$\sin 2\phi + \left(\frac{E_1\Gamma_2}{KE_2r}\right)\sin(\phi + \phi_0) = 0$$

考虑在泵浦场阈值之下运转情况. 若输入弱信号场 $E_1/\Gamma_1 \ll 1$, 当 $\phi_0 = 0$, 从方程(3)得到亚谐波场振幅 r 近似为:

$$r = \frac{E_1}{\Gamma_1} \frac{1}{1 - (E_2/E_2^c)} = \frac{E_1}{\Gamma_1} \frac{1}{1 - d} \quad (\phi = n\pi)$$

其中 $d = (E_2/E_2^c)$. 当 $\phi_0 = \pi/2$ 时, 同样得到:

$$r = \frac{E_1}{\Gamma_1} \frac{1}{1 + d} \quad [\phi = (n + \frac{1}{2})\pi]$$

因此, 低于泵浦阈值的弱信号场产生的经典增益为

$$\begin{aligned} G &= \frac{r^2}{(E_1/\Gamma_1)^2} = \frac{1}{(1-d)^2} \quad (\phi_0 = 0) \\ G &= \frac{1}{(1+d)^2} \quad (\phi_0 = \pi/2) \end{aligned} \tag{4}$$

从(4)式看出, 在一定的泵浦功率下, 经典增益依赖于泵浦阈值, 阈值越低, 增益越高. 当入射信号场与泵浦位相相同时, 增益达到最大. 根据阈值功率 $P_2^c \propto \epsilon_2^c = \Gamma_1 \Gamma_2 / K$, 求得^[6]:

$$P_2^c = \frac{\pi^2}{4F_{\omega_1}^2 \beta_{\omega_2} E_{NL}}$$

其中 F_{ω_1} 为光学参量振荡腔对亚谐波场的精细度, β_{ω_2} 为注入泵浦场在腔内的共振增强系数, E_{NL} 为非线性转换效率, 取 $\beta_{\omega_2} \sim 10$, $E_{NL} = 4 \times 10^{-4}/W$ (KTP), 对低精细度(70, 70)和高精细度(90, 70)腔, 计算得到绿光泵浦阈值分别为 ~ 125 mW 和 75 mW. 在泵浦功率为 30 mW 和 40 mW 两种情况下, 根据(4)式计算低精细度腔的经典增益分别为 $G \sim 1.7$, $G \sim 2.2$ (实验结果为 1.5 和 2), 而在泵浦功率为 30 mW 时高精细度腔 $G \sim 2.8$ (实验结果为 2.2). 理论计算和实验结果基本符合.

4 结束语

实验测定了光学参量振荡腔内非简并参量下转换过程, 在三模共振情况下的经典增益, 并得到了与理论分析基本一致结果, 使光学参量振荡腔运转达到最佳状态. 实验可用于研究光场的非经典性, 在上述运转条件下, 获得了双模正交位相振幅压缩态光场, 有关结果已在另文发表^[5].

参 考 文 献

- [1] L-A Wu, H. J. Kimble, J. L. Hall *et al.*, Generation of squeezed states by parametric down conversion. *Phys. Rev. Lett.*, 1986, 57(20): 2520~2523
- [2] 刘晶, 谢常德, 廉毅敏等, 双 KTP 晶体倍频过程的实验研究——腔外串接倍频. 光学学报, 1991, 11(5): 409~411
- [3] 刘晶, 谢常德, 廉毅敏等, 双 KTP 晶体倍频过程的实验研究——光学参量振荡腔内串接倍频. 光学学报, 1991, 11(7): 602~606
- [4] P. D. Drummond, K. J. McNeil, D. F. Walls, Non-equilibrium transitions in sub/second harmonic generation. *Optica Acta*, 1980, 27(3): 321~335
- [5] Kunchi Peng, Changde Xie, Maoquan Huang *et al.*, Resonance of three modes in OPO cavity and generation of two-mode squeezed state light. *Proc. SPIE*, 1992, 1726
- [6] Wu Lingan, Min Xiao, H. J. Kimble, Squeezed states of light from an optical parametric oscillator. *J. O. S. A. (B)*, 1987, 4(10): 1465~1475

Classical gain in nondegenerate optical parametric oscillator

LIU Jing ZHANG Tiancai LIAN Yimin

YU Chen XIE Changde PENG Kunchi

(*Institute of Opto-electronic Researches, Shanxi University, Taiyuan 030006*)

YU Zhenggang JIANG Dehua

(*Chemistry Institute of Shandong University, Jinan 250100*)

(Received 3 July 1992; revised 28 October 1992)

Abstract

By using two crystals series, temperature tuning and optical wedge complement, the simultaneous resonance of three modes for pump and two nondegenerate subharmonic field in optical parametric oscillator (OPO) cavity has been experimentally demonstrated. The classical gain of subharmonic field has been measured and calculated with semi-classical theory. The experimental results are in agreement with the theoretical analyses.

Key words optical parametric oscillator, three modes resonance, classical gain.