

# 种子注入光学参量振荡器的纵模特性研究

赵永华 何慧娟 王之江

(中国科学院上海光机所 上海 201800)

**提要** 主要对种子注入单纵模光学参量振荡器的纵模特性进行了理论和实验研究。利用数值模拟方法,对光参量振荡器中的场强方程进行了求解,得出在种子注入情况下,单纵模脉冲光参量振荡器的输出光频率主要由谐振腔纵模频率决定,而注入光频率与腔纵模频率的偏差应小于腔纵模间隔。并利用多纵模的 He-Ne 激光器作为种子光,成功地获得了单纵模参量光输出。

**关键词** 光参量振荡器,种子注入,单纵模

## 1 引 言

光学参量振荡器(OPO)有很多优点,如很宽的调谐范围、较高的能量转换效率等。在某些波段,光参量振荡是获得可调谐相干光的唯一途径,或者是一种最有效的手段。但是,作为一种可调谐相干光源,光参量振荡器也具有一些固有缺点,其中最突出的是其输出光线宽较大,并且随输出光波长的变化而变化<sup>[1-3]</sup>。当然,有很多方法可以克服这一缺点,最简便的自然是在 OPO 腔内加入各种色散元件,如棱镜、光栅、标准具等。采用这种方法,人们可以得到窄线宽甚至单纵模的可调谐参量光输出<sup>[4,5]</sup>。然而,加入色散元件后将使 OPO 腔内损耗增大,从而增加了 OPO 的阈值泵浦功率,也使能量转换效率大大下降。因此,为了得到高效率的可调谐窄线宽参量光,人们常常采取主从振荡器模式,即 MOPO 方式<sup>[6-8]</sup>。该方式以一台窄线宽参量振荡器或可调谐激光器为主振荡器(Master Oscillator),其输出光作为种子光注入到另一台光参量振荡器(Power Oscillator),该振荡器不含任何色散元件,因而能获得很高的转换效率。另一方面,由于种子光的线宽和横模特性均能利用主振荡器达到很高的要求,所以,若振荡器的模式能和种子光很好地耦合,就能得到高效的可调谐窄线宽参量光输出。

对于种子注入调 Q 激光器,国外已有不少学者进行了较为详细的研究<sup>[9,10]</sup>。这里,我们要指出的是,对于调 Q 激光器这种高增益振荡器来说,窄线宽的种子注入光所起的作用主要是纵模选择,而非频率锁定(Injection Locking),也就是说,种子注入调 Q 激光器的输出光频率由其谐振腔纵模频率决定<sup>[10]</sup>,该纵模是最靠近种子光的频率,因而,注入光和输出光频率之间常常有一定的失谐量。

上述结论在某种程度上也适合于单共振的脉冲参量振荡器,但有些方面又有些不同。首先,参量振荡器是一种三波相互作用的非线性光学效应,其位相关系比较复杂,这必将影响输出光频率;其次,在脉冲光参量振荡器中,参量光的增益随着泵浦光强的变化而变化,其行为更类似于增益开关的激光器,而非前面所述的调 Q 激光器。因此,本文从理论上对光参量振荡器

种子注入后的纵模特性进行了细致研究,并在实验上实现了种子注入的单纵模光参量振荡器。

## 2 种子注入理论和数值计算结果

描述三波相互作用最有效的理论工具是耦合波方程<sup>[11]</sup>,由于我们这里主要研究输出光的频率特性,因而可以不考虑泵浦光的耗散。此时,信号光场强( $E_s$ )和闲置光( $E_i$ )在非线性晶体中的传播方程可表示为

$$\begin{aligned} \frac{dE_s}{dz} + \alpha_s E_s &= i\kappa_s E_p E_i^* \exp(i\Delta kz) \\ \frac{dE_i}{dz} + \alpha_i E_i &= i\kappa_i E_p E_s^* \exp(i\Delta kz) \end{aligned} \quad (1)$$

式中 $\alpha_m$ 为晶体对信号光和闲置光的吸收系数, $\Delta k = k_p - k_s - k_i$ 代表波矢失配量, $\kappa_m$ 为耦合系数,其值为

$$\kappa_m = \frac{\omega_m d_{\text{eff}}}{n_m c} \quad m = s, i \quad (2)$$

式中 $d_{\text{eff}}$ 为晶体的有效非线性系数, $n_m$ 为晶体的折射率, $\omega_m$ 为信号光和闲置光的角频率。此处假定泵浦波具有平面波形式,同时也不考虑晶体双折射引起的离散效应。由于主要研究光参量振荡器的频率特性,因此上述假定不会影响其主要特征。

由于空闲波是不谐振的,即 $E_i(0) = 0$ ,从(1)式可以解得

$$E_s(l) = E_s(0) \exp[-(\alpha - i\Delta k/2)l] \left[ \cosh(\Gamma l) - \frac{i\Delta k}{2\Gamma} \sinh(\Gamma l) \right] \quad (3)$$

式中 $\Gamma$ 为参量增益系数,其值为

$$\Gamma = \sqrt{\kappa_s \kappa_i E_p^2 - (\Delta k)^2} \quad (4)$$

在脉冲光参量振荡器中,泵浦光强是随时间变化的。设其时间波形为高斯形,则 $\Gamma$ 随时间的变化可表示为

$$\Gamma = \Gamma_0 \exp[-(t/\tau_p)^2] \quad (5)$$

式中 $\tau_p$ 为泵浦脉冲宽度。

设信号光在某一时刻 $t$ 的场强为 $E_s(t)$ ,经过谐振腔往返一次之后,其场强应为

$$\begin{aligned} E_s(t + 2\tau) &= E_s(t) \sqrt{R} \exp[-(\alpha - i\Delta k/2)l] \left[ \cosh(\Gamma l) - \frac{i\Delta k}{2\Gamma} \sinh(\Gamma l) \right] \exp(i2kL) + \\ &E_0(t + 2\tau) \end{aligned} \quad (6)$$

上式中 $2\tau$ 为光在腔内往返一次所需的时间,其值为 $2L/c$ , $L$ 为腔长, $R$ 为腔镜反射率, $E_0(t + 2\tau)$ 为种子注入信号光的场强。

在慢变振幅近似下,(6)式可表示为微分方程的形式,即

$$\frac{dE_s}{dt} = m(t) \left[ E_s(t) + \frac{E_0(t)}{\exp[2\tau m(t)] - 1} \right] \quad (7)$$

其中

$$m(t) = \frac{1}{2\tau} \left[ \ln \sqrt{R} - \alpha + i\Delta l/2 + \ln[\cosh(\Gamma l)] \right] + i\Delta\omega \quad (8)$$

上式中已忽略了 $\sinh(\Gamma l)$ ,因其远小于 $\cosh(\Gamma l)$ 项。 $\Delta\omega$ 项代表种子注入光与腔纵模之间的角频率差。

由于(8)式中的 $\Gamma$ 是随时间变化的,因而只能采用数值求解方法。在求解之前应首先确定

$E_s$  的初值, 这可以通过以下方法求得。在泵浦脉冲到来之前, 注入光在谐振腔内的光强已处于稳态, 即  $\frac{dE_s}{dt} = 0$ , 从而可得初值条件为

$$E_{s0} = - \frac{E_0}{\exp[2\pi m(t)] - 1} \quad (9)$$

方程(7) 为复数方程, 联合(8) 式和(9) 式后可以用计算机求解, 解得  $E_s$  的角度分量对时间的导数就是  $E_s$  和注入光  $E_0$  之间的频率差。计算时光参量振荡器的参数如表 1 所示。由于没有考虑到泵浦耗散, 所以计算时所采用的泵浦强度较低, 略大于参量振荡器的阈值, 但正如下面所述, 这点将不会影响所得的计算结果。

表 1 模拟计算时的 OPO 参数

Table 1 Values of OPO used in calculation

Cavity length	25 mm	Seed power	1 W/cm <sup>2</sup>	Pump intensity	1 MW/cm <sup>2</sup>
Pump pulse width	10 ns	Mirror reflectivity	83%	$d_{\text{eff}}$	7 pm/V
Crystal length	20 mm				

设种子注入功率密度为 10 W/cm<sup>2</sup>, 其角频率与谐振腔纵模(最靠近的一个)角频率之差为 500 MHz。计算结果如图 1 所示, 其中 (a) 表示信号光角频率与注入光角频率之差随时间的变化, (b) 表示信号光强度随时间的变化, (c) 表示泵浦光波形。从图中可以看出, 在参量光脉冲的建立阶段, 其角频率已由种子光频率处转变为纵模频率处, 因此, 脉冲光参量振荡器的输出光频率和其纵模频率完全一致。由于上述频率转换过程发生于参量光脉冲建立阶段, 此时没有泵浦耗散。因此, 即使在强泵浦情况下, 上述结论依然是成立的。

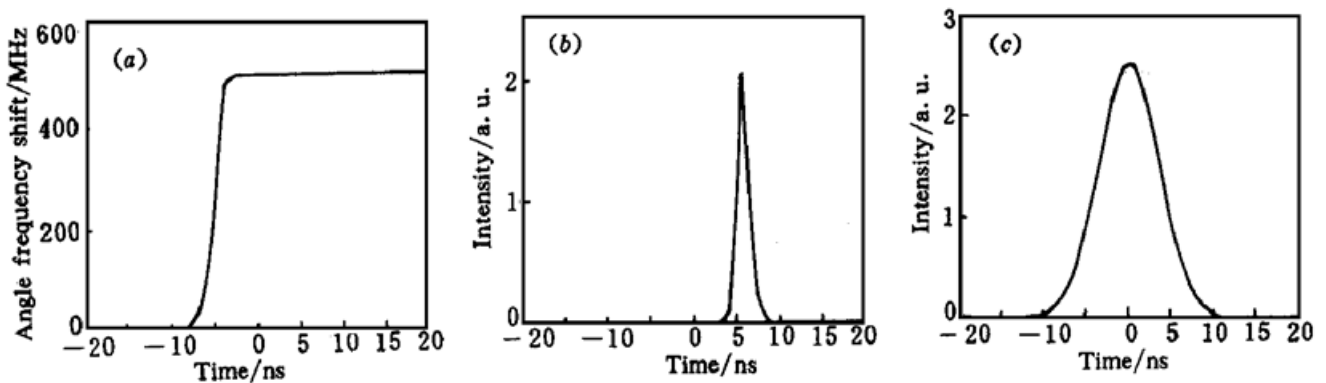


图 1 种子注入光参量振荡器中振荡频率移动的数值计算结果

(a) 相对于种子光的角频率; (b) 信号光强度; (c) 泵浦光强度

Fig. 1 Numerical result of frequency shift in the injection seeded optical parametric oscillator

(a) Angular frequency relative to the injection seeder; (b) Intensity of signal; (c) Pump intensity

当然, 上述结论并不意味着  $\Delta\omega$  可以取任意值, 事实上, 在种子注入光参量振荡器中, 我们总是尽量使种子注入光的频率和腔纵模频率一致。这是因为,  $\Delta\omega$  的大小将影响光参量振荡器的建立时间, 这一点可以从图 2 中看出来。该图也是通过计算机求解(7) 式得到的, 图中实线表示  $\Delta\omega = 0$  时光参量脉冲随时间的变化, 由于脉冲强度过大, 其上半部分没有表示出来, 但从中可以看出参量脉冲的建立时间。虚线表示  $\Delta\omega = 6$  GHz 时的参量脉冲, 显然其脉冲建立时间较晚, 强度也小得多。作为对比, 图中也画出了没有种子注入时的光参量脉冲输出波形(点线)。从

图中可以看出,种子注入能减小参量光脉冲的建立时间。这样,在其他纵模的参量光脉冲建立以前,该纵模已优先使泵浦光产生耗尽,从而抑制其他纵模振荡。从图中还可以发现,  $\Delta\omega$  越大,光参量脉冲的建立时间就越长,甚至接近没有种子注入时的脉冲建立时间。这种情况下,许多纵模就能同时振荡产生参量光,种子注入也就失去了意义。因此,在设计种子注入光参量振荡器时,应采取某些手段,如电子伺服等,使注入光的频率和腔纵模频率尽量一致,从而获得单纵模振荡。

以上结果都是在假定位相匹配 ( $\Delta k = 0$ ) 的情况下得到的。若  $\Delta k \neq 0$ , 从(8)式可以看出,这也将引起输出光频率的变化,其效果是产生  $\left[ \Delta\omega + \frac{\Delta kl}{4\tau} \right]$  的频率偏移,也就是说,输出光频率和纵模频率之间将有  $\frac{\Delta kl}{4\tau}$  的偏差。尽管这种频率偏移量较小,但在较精密的测量中,已有学者观测到了这种现象<sup>[12]</sup>。

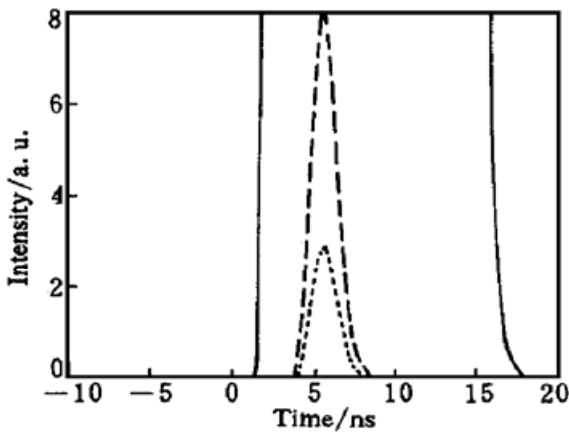


图 2  $\Delta\omega = 0$  (图中实线),  $\Delta\omega = 100$  GHz (虚线) 以及没有种子注入时(点线)参量振荡光信号的上升时间

Fig. 2 Rise-time of the injection-seeded optical parametric oscillator when  $\Delta\omega = 0$  (solid line),  $\Delta\omega = 100$  GHz (dashed line) or when no injection (dotted line)

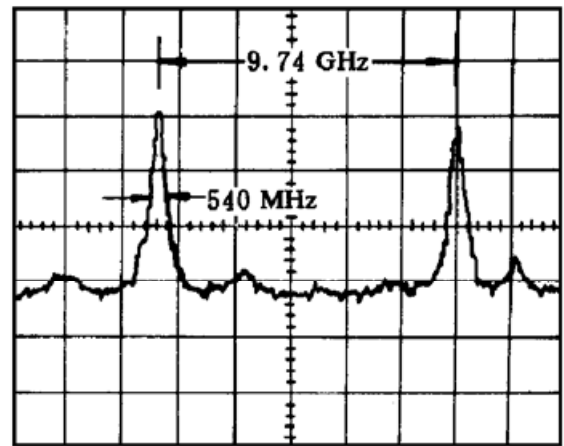


图 3 种子注入光参量振荡器的输出光线宽测量结果,采用带光电二极管阵列 F-P 干涉仪测量

Fig. 3 Measured result of the injection seeded OPO output linewidth by a Fabry-Perot interferometer with a photodiode array detector

### 3 实验结果

在上述理论基础上,实现了单纵模 BBO 光参量振荡器。该装置用调 QNd:YAG 的三倍频光(355 nm)泵浦,以  $\beta$ -BaB<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 为非线性晶体构成光参量振荡器,腔长约为 2 cm。实验中作为种子注入源的是一台 He-Ne 激光器,输出功率约为 4.3 mW,其偏振方向和 OPO 信号光的偏振方向一致。由于 He-Ne 激光腔中没有采用任何稳频措施,所以其输出光不是单纵模的。用扫描干涉仪观测,可发现同时有 4~6 个纵模在振荡。因为氦氖激光器腔长约为 1.1 m,所以其总带宽约为 680 MHz。另一方面,由于 OPO 的腔长较短,其纵模间隔应大于 6 GHz,因此,采用标准的电子伺服技术,很容易使 OPO 腔的纵模频率和氦氖种子光的频率之差保持在很小的范围之内( $< 1$  GHz)。这样,尽管 He-Ne 激光是多纵模的,但其每一个纵模频率都位于 OPO 谐振腔的某个纵模附近。从前面的理论分析可知,即使 He-Ne 光的频率与该纵模频率存在偏差,参量光脉冲的频率也将等于该纵模频率,也就是说,参量光脉冲将是单纵模的。

实验测量结果证实了上述理论。我们采用 10 mm 厚的 Fabry-Perot 干涉仪测量种子注入后 OPO 的输出线宽, 结果如图 3 所示。由于 F-P 干涉仪的自由光谱范围为 9.74 GHz, 即图中两个峰值之间的距离。因此, OPO 的线宽小于 1 GHz, 约 540 MHz。显然, OPO 的输出光为单纵模。在采用前述的电子伺服技术后, 单模振荡的稳定时间可超过半小时。

### 参 考 文 献

- 1 S. E. Harris. Tunable optical parametric oscillators. *Proc. IEEE*, 1969, **57**(12): 2096~ 2113
- 2 S. J. Brosnan, R. L. Ryer. Optical parametric oscillator threshold and linewidth studies. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1979, **QE-15**(6): 415~ 431
- 3 W. R. Bosenberg, W. S. Pelouch, C. L. Tang. High-efficiency and narrow-linewidth operation of a two-crystal  $\beta$ -BaB<sub>2</sub>O<sub>4</sub> optical parametric oscillator. *Appl. Phys. Lett.*, 1989, **55**(19): 1952~ 1954
- 4 T. K. Minton, S. A. Reid, H. L. Kim *et al.*. A scanning, single mode, LiNbO<sub>3</sub>, optical parametric oscillator. *Opt. Comm.*, 1989, **69**(3, 4): 289~ 293
- 5 W. R. Bosenberg, D. R. Guyer. Single-frequency optical parametric oscillator. *Appl. Phys. Lett.*, 1992, **61**(4): 387~ 389
- 6 D. C. Hovde, J. H. Timmermans, G. Scoles *et al.*. High Power injection seeded optical parametric oscillator. *Opt. Comm.*, 1991, **86**(3, 4): 294~ 300
- 7 M. J. T. Milton, T. D. Gardiner, G. Chourdakis *et al.*. Injection seeding of an infrared optical parametric oscillator with a tunable diode laser. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(4): 281~ 283
- 8 B. C. Johnson, V. J. Newell, J. B. Clark *et al.*. Narrow-bandwidth low-divergence optical parametric oscillator for nonlinear frequency-conversion applications. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1995, **12**(11): 2122~ 2127
- 9 J. L. Lachambre, P. Lavigne, G. Otis *et al.*. Injection locking and mode selection in TEA-CO<sub>2</sub> laser oscillators. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1976, **QE-12**(12): 756~ 764
- 10 Y. K. Park, G. Giuliani, R. L. Byer. Single axial mode operation of a Q-switched Nd:YAG oscillator by injection seeding. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1984, **QE-20**(2): 117~ 125
- 11 A. Yariv. *Quantum Electronics*. Shanghai: Shanghai Press of Science and Technology, 1983. 451 (in Chinese)
- 12 T. D. Raymond, W. J. Alford, A. V. Smith. Frequency shifts in injection-seeded optical parametric oscillators with phase mismatch. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(19): 1520~ 1522

## Characterization of Longitudinal Mode in an Injection Seeded Optical Parametric Oscillator

Zhao Yonghua He Huijuan Wang Zhijiang

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

**Abstract** The theoretical and experimental study on the single-longitudinal-mode of an injection-seeded optical parametric oscillator is presented. The numerical result shows that the frequency of the parametric output was determined by the longitudinal mode frequency of the cavity, if the frequency shift of the seeder was smaller than the axial mode separation. It was supported by an experiment on a single-longitudinal-mode BBO OPO which was seeded by a multi-longitudinal-mode He-Ne laser.

**Key words** OPO, injection-seeding, single-longitudinal-mode