

光参量振荡器的复合腔调频*

吴 穷** 许祖彦 张东香 周 翊

(中国科学院物理研究所光物理开放实验室 北京 100080)

提要 将复合腔调频技术应用于光参量振荡器。采用 Nd:YAG 激光之三次谐波同步泵浦 BBO 晶体, 与传统的单独掠射光栅调频腔(Littman 结构) 相比, 在线宽相同前提下, 降低了振荡阈值, 提高了输出功率。同时给出了复合腔调频的物理机制。通过复合腔的特别设计得到了窄线宽、高功率的同时输出。

关键词 复合腔调频, BBO, OPO

1 引 言

从 1965 年第一次实现光参量振荡以来^[1], 光学参量振荡器(OPO)作为一种可调谐激光光源, 以其独特的优良特性吸引了众多研究者的兴趣。但是多年来参量激光的研究发展不快, 无法与其它可调谐光源相竞争。究其原因, 主要是参量激光对工作物质材料特性要求十分苛刻, 既要有宽广的透过谱、高的损伤阈值、大的有效非线性系数及易于生长成高质量、大体积的单晶, 同时还要具备高功率、高光束质量的激光泵浦源^[2]。近些年来, 配合非线性晶体学的发展, 相继实现了从深紫外到红外波段的全波段调谐, 同时采用各种技术使能量转换效率及输出功率有了大幅度的提高^[3], 为 OPO 的实用化、商品化打下了坚实的基础。但参量激光器也有其明显的缺点, 即输出线宽非常地宽(特别在简并点附近), 这就限制了它的广泛应用。研究者们尝试了许多种压窄线宽的方案, 但都无法从根本上解决窄线宽 OPO 中长期存在着的高阈值与低效率问题。本文采用了一种新型的“复合腔”结构, 借助于激光模式竞争效应, 成功地解决了这一问题。

2 复合腔的特别设计与理论分析

一般激光器中, 调频和压窄线宽通常采用腔内插入选频元件, 以增加非被选模的损耗, 令其有效增益低于激光阈值^[4]; 另一种是种子注入锁定技术^[5], 使被选模在模式竞争中占优势从而抑制其余模式的振荡。前一种方法阈值高、效率低, 不易输出高功率, 需要较高的泵浦功率密度, 这就容易损伤低阈值的腔内选频元件及腔镜^[6]; 后一种方法虽能输出高功率, 但是难于解

* 本工作得到中国科学院“八·五”重点科研项目的支持及国家重大项目的部分资助。

** 现在地址: 中国科学院力学研究所, 北京 100080。

收稿日期: 1996—01—08; 收到修改稿日期: 1996—05—06

决有效的宽调谐、窄线宽种子源产生等问题。

通常情况下, 要得到窄线宽, 一般要以牺牲效率为代价, 如 Bosenberg 等人采用掠入射光栅腔结构^[7], 虽实现了窄线宽、宽调谐运转, 但由于光栅的入射角很大(88°), 腔内损耗很高, 以致于使参量激光振荡的阈值过高(80 MW/cm^2), 导致产生激光的效率很低。正常工作时的泵浦功率密度高达 200 MW/cm^2 以上。

脉冲染料激光器中的复合腔结构^[8]给了我们很大的启迪, 它利用了自注入锁模原理, 运用双腔结构使输出得到了高功率与窄线宽。Do-Kyeong Ko 等人在脉冲钛宝石激光器中也运用了类似的腔型, 达到了同样的效果^[9]。经改变后, 我们把它运用于参量振荡器中, 图 1 为此类腔型的结构示意图, 图 2 为此类腔型的一个运用实例。

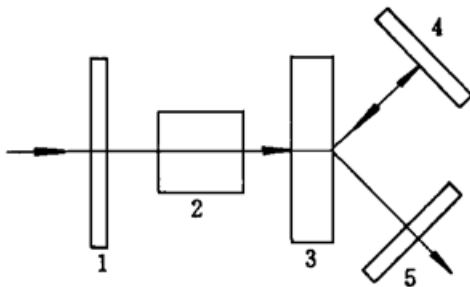


图 1 复合腔结构示意图

1: 输入镜; 2: 非线性光学晶体; 3: 分光器;
4: 色散元件或腔镜; 5: 输出镜

Fig. 1 The compound cavity configuration in OPO

1: input mirror; 2: nonlinear crystal; 3: beam splitter;
4: reflecting mirror; 5: output mirror

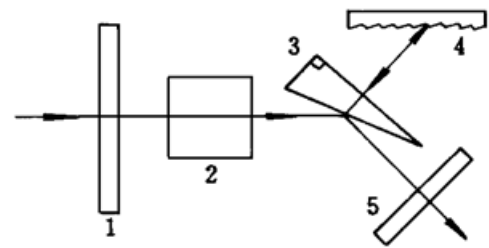


图 2 掠入射棱镜复合腔调谐原理图

1: 输入镜; 2: 非线性光学晶体; 3: 棱镜; 4: 光栅; 5: 输出镜

Fig. 2 The compound cavity configuration with the prism preexpanded

1: input mirror; 2: nonlinear crystal; 3: prism;
4: grating; 5: output mirror

以信号波共振为例。图 1 中 1 和 5 为信号波高反腔镜, 对闲置波高透; 2 为非线性光学晶体, 如可用 BBO 或 KTP 晶体; 3 为分光器, 或为兼有分光器功能的色散元件(如可用掠入射光栅或掠入射棱镜); 4 为色散元件(如光栅)或腔镜。其激光产生的过程为: 当非线性晶体被适当泵浦时, 所产生的信号光以 $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4$ 顺序产生窄带激光振荡, 同时以 $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 5$ 顺序产生宽带激光振荡。窄带腔具有高的腔内损耗、低的品质因子(低 Q 值); 宽带腔具有低的腔内损耗和高品质因子(高 Q 值)。由于两腔的复合作用, 并借助于激光模式竞争效应, 窄带腔的窄带激光模式将锁定宽带腔的激光振荡模式, 并具有宽带腔阈值低、效率高的优点, 从而实现低阈值、高效率 and 窄线宽的激光振荡, 并导致参量激光的宽调谐、高功率、窄线宽输出。对闲置波共振亦是如此。

从复合腔调频的物理机制上看, 这是一个比较复杂的过程, 它不同于种子注入锁模或自注入调频, 也不同于腔内插入选频元件调频。种子注入锁模是事先产生了一个有一定强度的窄线宽种子, 注入后就会优于其它模式生长, 从而使被选模式竞争中占优势而抑制其余模式的振荡; 插入选频是通过增加非被选模的损耗, 令其有效增益低于激光振荡阈值而无法起振。而对于复合腔结构, 并不能首先使窄带种子模式形成一定的强度, 此时起作用的是被选模式的品质因子, 品质因子高的模损耗小, 增长就快, 从而抑制了其它模的生长。在宽带腔增益曲线内的各模式的品质因子是相似的, 它们都从起初的噪声状态开始增长, 若无外来因素的影响, 则各模式增长的速度也可认为是相同的, 作用的结果便是各模同时振荡、共同存在; 而当窄带腔把对

应于宽带腔增益曲线内的某个模式加入进宽带腔后, 宽带腔增益曲线的这个模式的品质因子便被提高了, 因此在模式竞争中便会占优势而抑制其余模式振荡。

可见复合腔调频对初始条件的要求较种子注入与自注入为松, 因此具有更强的压窄线宽的能力与更大的实用价值。即使在单独使用窄带腔(如单独掠射光栅调频腔), 由于阈值高而无法振荡出光的情况下, 复合腔也有可能达到稳定输出, 这是其区别于种子注入调谐的独特之处。

3 实验装置

实验装置如图 3 所示。实验中, 泵浦源采用调 Q Nd:YAG 的三次谐波(Quantal, model YG517C-10), 脉宽为 5 ns, 频率为 10 Hz。所用的 π -型相位匹配 BBO 晶体参数如下: 切角 $\theta = 28.5^\circ$, $\psi = 0^\circ$, 大小为 $6 \times 8 \times 14 \text{ mm}^3$; 晶体表面未镀膜; 光栅为 2400 lines/mm 的全息光栅, 尺寸为 $68 \times 37 \text{ (mm)}$, 保证了在大角度掠射下参量光不会逸出光栅面, 为了获得高衍射效率, 一般取一级衍射 ($m = 1$), 同时将光栅常数 d 设计成满足下式的数值区间内:

$$\frac{\lambda}{2} < d < \lambda \quad (1)$$

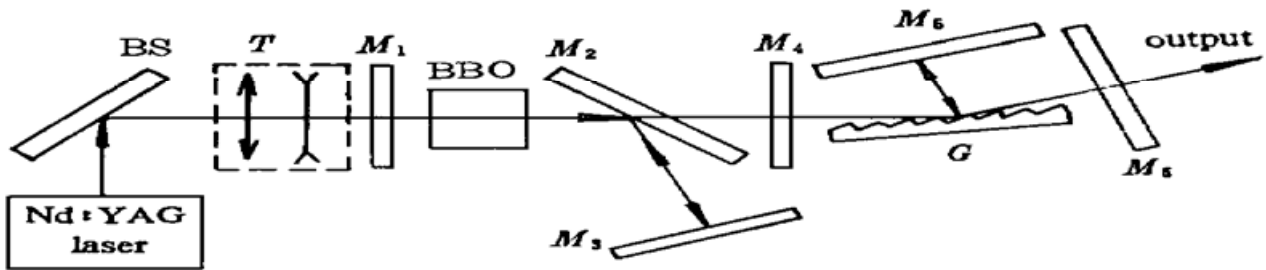


图 3 复合腔调谐光参量振荡器实验原理图

BS: 45° 全反泵浦光镜; T: 泵浦光压缩系统 (1.5×1); G: 全息光栅; M_1 : 输入镜; M_2 : 45° 全反泵浦光镜;
 M_3 : 垂直全反泵浦光镜; M_4 : 旋光镜; M_5 : 宽带全反镜; M_6 : 输出镜

Fig. 3 Schematic diagram of the OPO with a new compound cavity design

BS: beam splitter; T: $1.5 \times$ compression telescope; G: grating (2400 lines/mm); M_1 : reflecting mirror; M_4 : rotation mirror;
 M_2 : reflecting pump beam mirror (45°); M_3 : reflecting pump beam mirror (90°); M_5 : tuning mirror; M_6 : output mirror

满足此条件的光栅在此工作波段内无二级以上衍射, 其中 λ 为振荡波长。 M_4 为旋光片, 使通过的参量光偏振方向旋转近 90° , 以保持晶体的色散方向与光栅角色散方向一致(有利于压窄线宽^[10]) 且参量光的偏振方向垂直于光栅的刻线方向(使光栅达到最高效率)。 T 为一组石英材料的望远系统 (1.5×1), 用以压缩泵浦光孔径, 提高泵浦功率密度; M_5 为一宽带全反镜, 呈长条状, 尺寸为 $70 \times 15 \text{ (mm)}$, 它把从光栅一级衍射出的参量光再顺原路返回, 形成窄带振荡, 微调 M_5 能起到一定范围内的调谐作用; M_2 为一块对泵浦光的 45° 全反镜, 与腔轴线置成布儒斯特角, 以减少参量光的损耗, 其主要作用是防止剩余泵浦光打坏光栅, 它与垂直全反泵浦光的 M_3 组成了泵浦光反馈系统 M_1 - M_2 - M_3 (设其长度为 L_3), 把一次作用晶体后剩余的泵浦光再重新返回再次泵浦, 这样可以使阈值降低近一倍。在我们设计的振荡器中, 同时存在着两个振荡器, 即主谐振腔 M_1 - G - M_6 与光栅调频腔 M_1 - G - M_5 , 腔长分别为 L_1 与 L_2 , 与 L_3 相比, 它们的关系被设置成 $L_2 \leq L_1 < L_3$, 这有利于窄带模在模式竞争中获得优势。与传统的 Littman 结构

相比,复合腔结构只是在光栅的零级衍射处加一个参量光的反射镜。在实验中,我们把各元件排列得尽量紧密,所有的 L 值都取得尽量的小,以获高效 ($L_1 = 12$ cm, $L_2 = 11.5$ cm, $L_3 = 13$ cm),因为参量振荡对腔长的变化十分敏感,这与染料及钛宝石激光器有明显的不同。

4 实验结果及分析

首先去掉窄带腔镜 M_5 ,只让宽带腔起振。当泵浦光能量为 38 mJ/pulse 时,使光栅处于 86.5° 掠入射状态,通过四组中心波长分别为 430 nm, 530 nm, 605 nm, 670 nm 的膜片,实现了 410~ 2630 nm 的宽带运转。测量波长采用了四平光学仪器厂制造的半米光栅光谱仪。

加上 M_5 ,形成复合腔结构。通过调节 M_5 ,我们成功地锁定了参量激光。用 0.6 mm 间隔的 F-P 标准具观测,可见在锁定前后,观测屏上明显地由模糊一片变成清晰的细亮条纹。测量干涉条纹最内环的外直径和内直径,计算出线宽(FWHM),并与用单色仪测得的宽带腔的线宽相比较列于表 1。可见,锁定后的参量线宽得到了很大程度的压窄。

表 1 运用复合腔前后光参量振荡器的
输出线宽对比

Wavelength (nm)	Linewidth* (nm)	Linewidth** (nm)
570	2.8	0.041
580	2.9	0.041
600	3.1	0.042
620	3.5	0.045
640	4.4	0.046

* the common OPO cavity;

** the compound cavity.

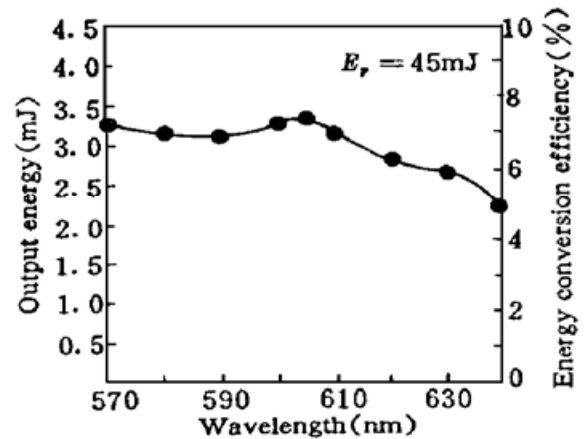


图 4 复合腔调谐光参量振荡器输出能量及转换效率
Fig. 4 Output energy and energy conversion efficiency of
the compound cavity VS. output wavelength

由于受到旋光片及大尺寸的长条镜 M_5 的限制,我们在实验中实现了 570~ 640 nm 的信号波窄线宽输出,根据参量模式锁定的原理,若信号波得以锁定,则闲置波也必定被锁定,反之亦然,则对应于窄线宽闲置波的范围为 796~ 940 nm。此时采用的一组膜片是: M_1 是中心波长为 605 nm 的全反镜(对 354.7 nm 的泵浦光透过率为 90%), M_6 对 570~ 640 nm 的透过率约为 15%。保持晶体不动单独微调 M_5 ,可在 1 nm 的可锁定范围内起到调谐作用。在 605 nm 处,我们测得单独光栅掠射腔的阈值为 36 mJ (58 MW/cm²),而加上零级反馈镜 M_6 后形成的复合腔阈值仅为 17 mJ (27 MW/cm²),可见运用复合腔后可使阈值降为原来的二分之一以下。当泵浦光能量为 45 mJ 时,我们测得单独掠射光栅腔的输出能量为 0.42 mJ,能量转换效率为 0.93%;而复合腔的输出能量为 3.32 mJ,能量转换效率为 7.4%,即在输出线宽相同的情况下,能量转换效率提高了近 8 倍。再提高泵浦光能量将会损坏腔镜 M_1 。图 4 所示为复合腔输出能量与波长的关系曲线。

由于受到光栅衍射效率的限制,实验中光栅掠入射角度只为 86.5° ,因此线宽压得不够窄。若采用高衍射效率的光栅掠射于 88.5° 以上,配以压电陶瓷同步微调腔长,则有望获得单

频输出。同时还应进一步缩短腔长,研制高损伤阈值的宽带膜片以提高参量转换效率。

致谢 感谢张秀兰高级工程师、冯宝华副研究员给予的帮助。

参 考 文 献

- 1 J. A. Giordmaine, R. C. Miller. Tunable coherent parametric oscillation in LiNbO₃ at optical frequencies. *Phys. Rev. Lett.*, 1965, **14**: 973
- 2 许祖彦. 光参量激光器——可调谐激光的进展. 中国激光, 1994, **A21**(5): 329
- 3 A. Fix, T. Schroder, R. Wallenstein *et al.*. Tunable β -Barium borate optical parametric oscillator: operating characteristics with and without injection seeding. *J. Opt. Soc. Am. B.*, 1993, **10**(9): 1744~1750
- 4 T. W. Hansch. Repetitively pulsed tunable dye laser for high resolution spectroscopy. *Appl. Opt.*, 1972, **11**: 69
- 5 Edward S. Cassedy. A theoretical study of injection turning of optical parametric oscillators. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1979, **QE-15**(11): 1290
- 6 Norman P. Barnes, James C. Barnes. Injection seeding theory. *IEEE. J. Quant. Electr.*, 1993, **QE-29**(10): 2670
- 7 W. R. Bosenberg, D. R. Guyer. Broadly tunable, single-frequency optical parametric frequency conversion system. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1993, **10**(9): 1716
- 8 许祖彦, 潘少华, 邓道群 等. 脉冲染料激光的复合腔调频. 物理学报, 1981, **30**(6): 820
- 9 Do-kyeong Ko, Gwon Lim, Sung-Ho Kim *et al.*. Self-seeding in a dual-cavity-type pulsed Ti:sapphire laser oscillator. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(7): 710
- 10 Michael Radunsky. Inside the Modern OPO. *Lasers & Optronics*, 1994, **11**: 18

Tuning of an Optical Parametric Oscillator Using a Compound Cavity

Wu Qiong Xu Zuyan Zhang Dongxiang Zhou Yi

(Laboratory of Optical Physics, Institute of Physics, Academia Sinica, Beijing 100080)

Abstract Tuning of a compound cavity has been applied to an optical parametric oscillator (OPO) for the first time to our knowledge, which not only reduced the laser threshold, but simultaneously realized narrow linewidth and high-power output as compared with a tuning cavity using just the grazing-incidence grating (Littman Configuration). The theoretical and experimental results are given as well as a practical experimental device as an example.

Key words turning of compound cavity, BBO, OPO