

文章编号: 0253-2239(2004)04-477-4

调 Q Nd:YAG 环形腔外腔倍频技术研究*

王旭葆 陈继民 李 港 左铁钊

(北京工业大学激光工程研究院, 北京 100022)

摘要: 用磷酸氧钛钾(KTP)作为倍频晶体,对 Nd:YAG 声光调 Q 激光的环形腔外腔倍频技术进行了实验和理论的研究,利用最大平均功率 50 W、声光调 Q、输出频率 1005 Hz、灯抽运 Nd:YAG 激光器做为基频光源,在基频输入功率 35 W 时,获得了大约为 31.4% 的光-光转换效率的绿光输出。从实验结果分析了环形腔倍频的特性,指出了该方法的优缺点。从光束质量和聚焦光斑直径方面,对基频光和二次谐波进行了比较,提供了利用 CCD 测得光斑的部分图片,分析了环形腔倍频的工作原理,解决了困扰倍频技术的转换效率问题和光束质量问题。

关键词: 激光技术; 倍频; 环形腔; 转换效率; 光束质量

中图分类号: TN248.1⁺3 文献标识码: A

Study of Frequency Doubling in a KTP Crystal on Q-Switch Nd:YAG Laser by the Resonant External Ring Cavity

Wang Xubao Chen Jimin Li Gang Zuo Tiechuan

(Institute of Laser Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100022)

(Received 14 October 2002; revised 12 June 2003)

Abstract: Basing on experiments and theories, we study frequency doubling in a KTP crystal on Nd:YAG laser by the resonant external ring cavity. The Nd:YAG laser average power is 50 W with Q-switch and its frequency is 1005 Hz. In the experiment we obtain 0.532 μm green light output with 31.4% light conversion efficiency when 1.064 μm input average power is 35 W. With the experimental results, we analyze the experimental results for the characteristics of ring cavity frequency doubling and summarize its strength and weakness. We compare fundamental frequency laser and second harmonic generation in terms of laser light quality. The thesis provides some pictures of beam focuses acquired with CCD, compares some experimental results with those pictures. We put forward a theory of the ring cavity frequency doubling in this paper.

Key words: laser technique; frequency doubling; ring cavity; conversion efficiency; beam quality

1 引 言

激光倍频技术是利用晶体的非线性效应,产生光学谐波,这种效应自 1961 年, Franken 等将红宝石激光器发出的约为 3 kW 的 694.3 nm 光脉冲聚焦到石英晶体上,观察到红宝石激光的二次谐波辐射以来,已经作为把相干光源扩展到更短波长的

手段。

激光倍频技术所面临的主要问题是转换效率低、输出频率不单一。目前,采用较多的方案是 L 腔和 Z 形腔,这两种腔型一般采取腔内倍频的方式,在千赫频率的固体激光下一般转换效率不高于 20%,且输出的倍频光频率不单一,混有基波成分较大^[1]。

环形腔倍频^[2~6]既可以保持高的转换效率又可以保证单一频率输出,我们利用最大平均功率 50 W、声光调 Q 输出频率 1005 Hz、灯抽运 Nd:YAG 激光器,在 Nd:YAG 激光谐振腔外做一个环形腔,实现了在基频输入功率 35 W 时,大约为 31.4% 的倍频效率。

* 国家重点基础研究发展规划(G2000067205)、北京市自然科学基金(2011002)资助课题。

E-mail: wang_xubao@163.com

收稿日期:2002-10-14;收到修改稿日期:2003-06-12

2 实验装置

环形腔主要由 M_1 、 M_2 、 M_3 、 M_4 四镜构成如图 1 所示。 M_1 、 M_2 为平面镜, M_3 、 M_4 均为平凹镜, 凹面曲率半径为 120.28 mm, M_4 为绿光输出镜, 对 $1.064 \mu\text{m}$ 高反 ($R \geq 99.5\%$), 对 $0.532 \mu\text{m}$ 增透 ($T \geq 85\%$), M_2 反射镜背面粘贴一个压电陶瓷 (PZT), M_1 对 $0.532 \mu\text{m}$ 高反, 对 $1.064 \mu\text{m}$ 反射率为 97% , M_1 、 M_2 、 M_3 、 M_4 形成一个稳定谐振腔, 磷酸氧钛钾 (KTP) 晶体位于该腔束腰处, 我们选用的 KTP 晶体尺寸为 $6 \text{ mm} \times 6 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$, $\theta = 90^\circ$, $\varphi = 23.5^\circ$, 双面镀 $1.064 \mu\text{m}$ 和 $0.532 \mu\text{m}$ 双波长增透膜。 M_4 后 45° 放置一个绿光反射率 95.8% 的反射镜 M_5 用来分光, 透过部分经过 $\lambda/4$ 波片, 被偏振分光棱镜 (PBS) 分为两部分, 分别传给两个光电二极管, 光电二极管将其变为电信号传给伺服电源, 伺服电源对两个电信号的大小进行比较后, 产生一个调制信号传给压电陶瓷使其相应得到一个形变, 从而控制腔长, 获得绿光最大增益, 单纵模稳定输出。

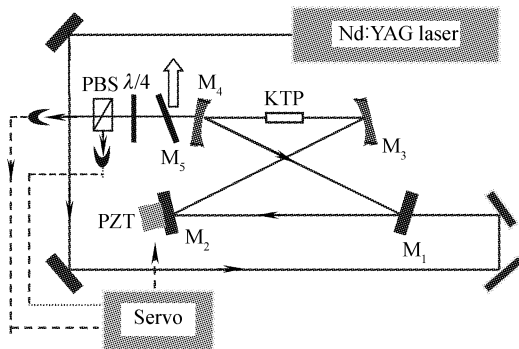


Fig. 1 Frequency doubling in a KTP crystal on Nd:YAG laser with Q-switch by the resonant external ring cavity

3 工作原理分析

环形腔与驻波腔不同, 环形腔只有单向倍频光。设 R_1 代表 M_1 的功率反射系数, R_{234} 代表其余三个腔镜的功率反射系的乘积, T_1 、 T_{234} 代表它们综合的功率透射系数。假定腔镜无其它损耗, 则有

$$R_1 + T_1 = R_{234} + T_{234} = 1.$$

根据 Boyd 等^[1] 的理论, 基频功率和谐波的输出功率都可以借助晶体透过率和腔镜特性计算出来。定义腔反射参量 R_m , 它表示基频光在腔内一次往返后剩下的部分所占比例, 对于环形腔, 只有一个方向产生谐波, 腔反射参量为

$$R_m = T_{t_{\text{FH}}} R_{234}$$

式中 T 为谐振腔内非线性材料的单程透射系数, t_{FH} 为基频光单程通过磷酸氧钛钾晶体后未被倍频的剩余部分的比例。用类似于多束干涉的方法对汇合点处反射光、透射光的复振幅进行处理, 可得

$$\frac{P_r}{P_1} = \frac{(\sqrt{R_1} - \sqrt{R_m})^2 + 4\sqrt{R_1 R_m} \sin^2(\delta/2)}{(1 - \sqrt{R_1 R_m})^2 + 4\sqrt{R_1 R_m} \sin^2(\delta/2)},$$

$$\frac{P_c}{P_1} = \frac{T_1}{(1 - \sqrt{R_1 R_m})^2 + 4\sqrt{R_1 R_m} \sin^2(\delta/2)},$$

P_1 是入射到腔内的基波功率, P_r 是从反射镜 M_1 外侧反射的基频光功率, P_c 是反射镜 M_1 内侧的往返基频光功率。 δ 为位相失配参量。在共振条件下, $\sin^2(\delta/2) = 0$, 反射的基频光功率为

$$P_r = P_1 \frac{(\sqrt{R_1} - \sqrt{R_m})^2}{(1 - \sqrt{R_1 R_m})^2}$$

如果 $R_1 = R_m$ 则 $P_r = 0$, 表示所有入射功率都耦合进环形腔。选择这个 M_1 镜的反射率使其能阻抗匹配谐振腔。共振时基频加强的倍数为

$$A = \frac{P_c}{P_1} = \frac{T_1}{(1 - \sqrt{R_1 R_m})^2} = \frac{1}{1 - R_1}$$

二次谐波的输出功率为

$$P_{\text{SHG}} = \eta P_c = \gamma_{\text{SHG}} P_c^2$$

其中 η 为光-光转换效率, γ_{SHG} 为非线性转换系数, 则共振时二次谐波功率加强的倍数为 A^2 。

从 M_1 透过的基频光经 M_2 、 M_3 反射后, 聚焦在磷酸氧钛钾晶体内, 产生绿光, 从腔镜 M_4 输出; 剩余的基频光返回到 M_1 开始新一轮运转, 周而复始; 当它们相位相同且满足 $R_1 = R_m$, 产生多光束干涉效应, 基频光得到大大增强, 从而使倍频效率提高, 二次谐波输出大大增强。

对于调 Q 基频光来说, 脉冲频率和光脉冲在环形腔内的运行周期相匹配, 也就是说当一个脉冲在腔内运行一周后, 恰好与刚刚耦合进来的另一个脉冲相遇, 二者是相干加强的, 这样周而复始, 每一个进入环形腔的脉冲都在环形腔内相干放大, 基频光脉冲就会大大加强。光脉冲在环形腔内运行一周或运行几个整数周后, 没有得到充分放大, 就是没有遇到其它的相干光脉冲时, 光电二极管接收到的光信号就会失衡, 通过比较器, 压电陶瓷伺服电源产生一个电脉冲, 电脉冲加在压电陶瓷上, 使其有一个形变, 推动着附着的镜片有一个微小的位移, 这个微小的位移与激光的波长同量级, 这样就对环形腔腔长改变, 使光脉冲经过一周的时间与激光脉冲间隔相匹配, 光脉冲就可以在腔内得到放大, 使倍频效果最佳化。

晶体热效应会使晶体的折射率 n 发生变化,同时使光程发生变化(这也相当于腔长发生了变化)。为了减小晶体热效应,我们对 KTP 晶体调整架采取水冷,但这并不能完全消除晶体的热效应,加之其它因素的影响,谐振频率的稳定性仍然是整个倍频效果的关键之一,因此我们采用了锁相放大器(图 1 中所示 servo、PZT 和光电二极管)对腔长适时调整,以抵消各种因素对谐振频率的影响,进而可以更加理想地保证腔内基频具有良好的相干性。

压电陶瓷上加有两种电压,一个是直流电压(0~300 V),用来控制谐振频率;另一个是频率为 f 的调制电压,用来对腔长 L 即谐振频率进行调制,从而使倍频光输出功率 P_{SHG} 也受到相应的调制。以基频光中心频率为稳定点,如果环形腔谐振频率刚好与基频中心频率重合,则调制电压使谐振频率在中心频率附近以 f 变化,由于锁相放大器(包含一个选频放大器)工作在特定的频率,伺服系统无信号输出,环形腔腔长无变化,继续使中心频率的基频光共振。如果环形腔受到外界干扰或是由于晶体热效应等的影响,使谐振频率偏离了中心频率,则伺服系统输出调制信号,使腔长发生相应变化,把环形腔谐振频率重新“拉”回基频光中心频率。

在调 Q 基频光输入时,可能由于锁相放大器的调制频率与声光调 Q 电源的调制频率不匹配,锁相放大器的伺服系统常有误信号,使得二次谐波输出极为不稳定,经常出现输出间断现象。为此,我们用两个光电二极管对同一脉冲的两个偏振分量进行比较,通过比较器对光信号取样。波片把出射的线偏振倍频光转变为圆偏振,偏振分光棱镜把线偏振分成两个垂直的偏振分量,由于偏振分光棱镜的分光特性,不同频率的波具有不同的分光效果,比较器预置中心频率的光强比,当光电二极管输出给比较器的两个值与预制比值相等时,伺服系统无信号输出;当光电二极管输出给比较器的两个值与预制比值不相等时,伺服系统输出一个信号电压,使得压电陶瓷把与之相连的镜片向前或向后作一个相应位移,调整了环形腔的长度,也就调整了腔谐振频率,使之恢复到适合中心频率倍频光输出,这个值与上述单个光电二极管工作时的腔的谐振频率一致。

4 转换效率的研究

我们对 Nd:YAG 环形腔倍频的转换效率和质

量进行了实验研究,用一个激光功率计放在激光输出端,测出基频光在不同输入功率 P_w 的情况下的倍频光输出功率 P_{SHG} ,用二次模型线性回归的方法,拟合出输入—输出功率曲线(如图 2),图中点为实验值,测量中发现,倍频转换效率,大约在输入基频功率 35 W 时达到最大,大约为 31.4%。可看出,输入功率在 1~35 W 情况下实验与理论接近,倍频效率基本按输入功率的增加而增大。

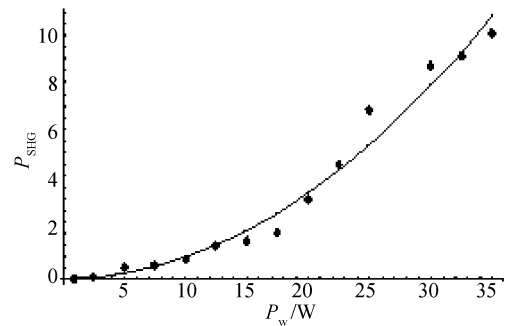


Fig. 2 The curve about input and output power of frequency doubling laser with a resonant external ring cavity

5 模式特性研究

我们对倍频前后的光束质量进行了比较,用 BEAMCODE SYS 光束质量分析仪分别对 25 W 平均功率的 $1.064 \mu\text{m}$ 激光、倍频后输出 7.8 W 平均功率的 $0.532 \mu\text{m}$ 激光进行了观察,结果如图 3,图中左侧为所在横截面的光斑在 BEAMCODE SYS 光束质量分析系统下获得的能量分布三维图,右侧为 BEAMCODE SYS 光束质量分析系统测得的光强分布平面图及其分布曲线。图 3(b)中 $0.532 \mu\text{m}$ 模式主要为基模,数据处理系统显示基模比例约为 91.25%。图 3(a)中激光电源工作情况与图 3(b)完全相同,数据处理系统显示基模比例约为 89.02%。

纵模特性和横模特性决定了激光的相干特性,由 3 中所述倍频效率受相干特性的制约。因此,我们对基频光源采取了相应的纵模选择(法布里-珀罗标准具法),由于实验条件限制,我们没有测定出基频光和二次谐波的纵模特性,因为普通的光谱分析仪分辨率不能满足,我们认为必须要应用诸如光纤频谱仪之类的仪器方可测定。实验中,未加入标准具前,二次谐波不可获得。前面图 2 所有功率数值都是在基频激光器加入法布里-珀罗标准具后测得的结果。

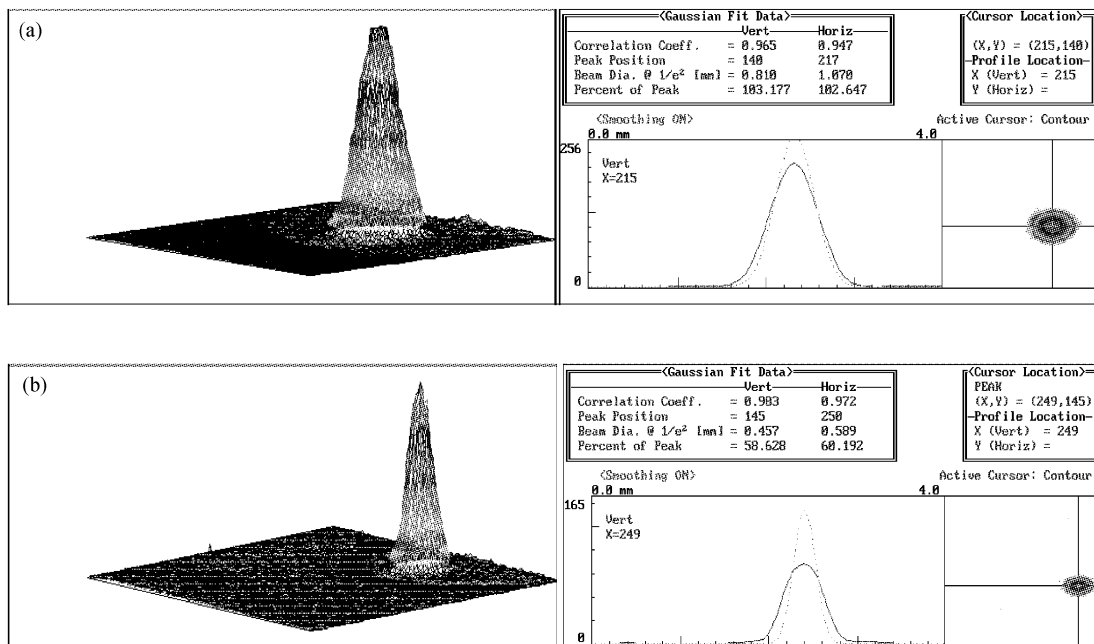


Fig. 3 The beam quality measured with BEAMCODE analytic system. (a) 1.064 μm ; (b) 0.532 μm

结论 本文对 Nd:YAG 激光倍频方案进行了设计,介绍了激光倍频的基本原理,对环形腔进行了设计,从理论上研究了环形腔倍频的工作原理和特性。本章是整个倍频工作的基础,对整个工作有着重要的指导作用。重要的贡献在于,不仅设计了现有条件下可以完成的实验,而且对整体设计作出了理论解释和合理的分析。

环形腔的耦合镜选择至关重要, $R_1 = R_m$, 符合该条件下,实际上入射光无反射,全部耦合进环形腔,进入环形腔的基频光在腔内周而复始的传输,并引起相干性而得到放大,因此对于准连续波,在设计腔长时不但要考虑环形腔的稳定性,而且要考虑,单一脉冲在腔内传输一周的时间与基频光脉冲间隔的匹配,以保证其在传输过程中得以相干放大。

本文研究了通过调整环形腔的腔长,实现环形腔的谐振频率的稳定,从而实现腔内传输的光波能够保持良好的相干性,在循环中得以共振放大。我们设计了用两个光电二极管进行对比取样的方法,使对输出谐波取样在准连续基频光输入的情况下工作状态不稳定得以解决。我们对该系统的稳定性进行了考察,在 5 h 工作情况下,功率波动均方根值约为 2.25%。该系统的弊端在于基本上每 8 h 需要重新调整一次,究其原因可能是环形腔本身含有振动因素(压电陶瓷),因此,其它镜片的防震是一个需要进一步解决的问题。

激光的光束质量是激光应用的重要指标之一,并且基频光光束质量直接影响倍频效率,本文利用实验的方法对基频光和倍频光光束质量进行了研究,利用 BEAMCODE SYS 光束质量分析仪得出了相应的实验结果。利用本文论述的方法我们得到了较好的光束质量的 0.532 μm 的激光,并在金属粉末微成型中较为成功地应用^[6]。

参 考 文 献

- 1 Wang Xubao, Chen Jimin, Wang Ri *et al.*. High efficiency Nd:YAG doubling frequency laser. *Chin. J. Lasers* (中国激光), 2003, **30**(3):203~205 (in Chinese)
- 2 Boyd G D, Kleinman A D. Parametric interaction of focused Gaussian light beams. *J. of Appl. Phys.*, 1968, **39**(8):3597~3639
- 3 Hadjar Y, Ducos F, Acef O. Stable 120-mW green output tunable over 2 THz by second-harmonic generation process in a KTP crystal at room temperature. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(18):1367~1369
- 4 Roisse E, Louradour L, Guy O *et al.*. Walk-off and phase-compensated resonantly enhanced frequency-doubling of picosecond pulses using type ii nonlinear crystal. *Appl. Phys. (B)*, 1999, **69**(1):25~27
- 5 Smith A V, Alford W J, Raymond T D *et al.*. Comparison of a numerical model with measured performance of a seeded, nanosecond KTP optical parametric oscillator. *J. Opt. Soc. Am. B.*, 1995, **12**(11):2253~2267
- 6 Hald J. Second harmonic generation in an external ring cavity with a brewster-cut nonlinear crystal: theoretical considerations. *Opt. Commun.*, 2001, **197**(3):169~173