

文章编号: 0258-7025(2004)10-1169-04

KTP 晶体环形腔外腔倍频 Nd:YAG 激光 光束特性的研究

王旭葆, 武 强, 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 为了解决精细聚焦问题,采用 Nd:YAG 倍频技术以获得短波长激光器。在激光烧结技术、获取短波长激光的方法、短波长激光光束特性等方面进行了研究和探讨。从理论和实验两方面,研究了利用 KTP 晶体对 Nd:YAG 激光进行环形腔外腔倍频的方法。这种倍频所利用的基频光最大平均功率为 50 W,采用声光调 Q 技术,频率约为 1005 Hz。当基频光平均功率约为 35 W 的情况下,实验中光-光转换效率约为 31.4%。利用 BEAMCODE SYS 光束质量分析系统对二次谐波与基波光束质量进行了比较,并比较研究了二次谐波与基波的聚焦特性。实验中测定的二次谐波 TEM₀₀ 模所占比例约为 95%。利用短波长可以获得更小聚焦尺寸,可以在激光粉末成型中得到更微小的成型尺寸,展示了二次谐波在微成型方面应用的初步成果。

关键词 激光技术;环形腔;外腔倍频;光束质量;焦点

中图分类号 TN 248.1⁺3 **文献标识码** A

Study of Beam Quality and Focus of Frequency Doubling in a KTP Crystal on Nd:YAG Laser by the Resonant External Ring Cavity

WANG Xu-bao, WU Qiang, CHEN Ji-min, LI Gang, ZUO Tie-chuan

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

Abstract In order to solve the problem of fine focus in laser assisted microprocessing, a method of Nd:YAG frequency doubling is adopted to acquire short wave laser. The frequency doubling in a KTP crystal on Nd:YAG laser is carried out by the resonant external ring cavity. The maximum average power of Nd:YAG is 50 W with Q-switch and its frequency is 1005 Hz. A 0.532 μm green light output with 31.4% light conversion efficiency is obtained when the average input power of 1.064 μm laser is 35 W. The proportion of TEM₀₀ model in the green light is 95%. This method is proved to be effective to solve the problem of mini-focus, especially useful in the application of laser rapid prototyping. The experimental results for the characteristics of ring cavity frequency doubling are analyzed and compared with those of 1.064 μm laser on the beam quality.

Key words laser technique; ring cavity; external cavity frequency doubling; beam quality; beam focus

1 引 言

选择性激光烧结(SLS)是以激光为能量源,以粉末为加工对象,结合计算机辅助控制的激光快速成型的方法。用选择性激光烧结的方法加工微小零件时,由于零件尺寸小,扫描光束的光斑尺寸就应足

够小,为了获得适合微加工的微细光斑,用调 Q Nd:YAG 激光器进行了实验和理论研究。

2 倍频装置

把激光光束看作高斯光束,当高斯基模光束经

收稿日期:2003-04-28;收到修改稿日期:2003-08-21

基金项目:国家 973 计划(G2000067205)和北京市自然科学基金(编号:2011002)资助项目。

作者简介:王旭葆(1972—),男,黑龙江庆安人,北京工业大学激光工程研究院博士研究生,主要从事计算机辅助激光快速成型激光器及光路设计的研究。E-mail:wangxubao1972@yahoo.com.cn

过一个焦距为 F 的薄透镜后,束腰满足关系

$$\frac{1}{w_0'^2} = \frac{1}{w_0^2} \left(1 - \frac{l}{F}\right)^2 + \frac{1}{F^2} \left(\frac{\pi w_0}{\lambda}\right)^2 \quad (1)$$

其中, w_0' 为通过薄透镜后的束腰半径, w_0 为物方束腰半径, l 为物方束腰与透镜的距离, λ 为光波波长。

像方透镜焦平面上的光斑半径为

$$w_f = \frac{\lambda}{\pi w_0} F \quad (2)$$

实际中,常用焦平面上的光斑尺寸代替腰斑尺寸。根据(2)式,物方腰斑 w_0 越大,透镜焦距 F 越短,波长 λ 越短就越有可能获得精细的聚焦,但是 w_0 不可能过大, F 过短会使焦深变得过小,从而不利于加工,因此,理论上研制短波长激光器是一个有效的方案,为此人们对 $1.064 \mu\text{m}$ 激光器进行倍频^[2~4],获得短波长激光输出。

应用这种倍频方案进行激光微成型的应用实验,通过精细聚焦,激光聚焦光斑可以控制在 0.015 mm 附近,获得了壁厚小于 0.1 mm 的实际成型件^[6]。

倍频装置^[6]如图1所示,环形腔主要由 M_1, M_2, M_3, M_4 四镜构成, 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

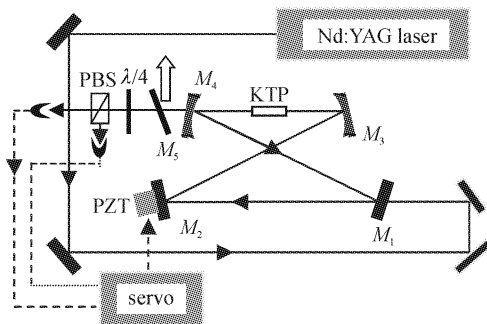


图1 Nd:YAG调Q激光环形腔倍频

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

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, KTP 晶体位于该腔束腰处,选用的 KTP 晶体尺寸为 $6 \text{ mm} \times 6 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$,位相匹配为 $\theta = 90^\circ$, $\varphi = 23.5^\circ$,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。倍频转换效率大约在输入基频功率 35 W 时达到最大,为 31.4% 。

3 倍频光与基频光在光束质量上的比较

光束光斑应用 BEAMCODE SYS 光束质量分析仪探测,由于 CCD 最佳工作范围为小于 30 mW/cm^2 的功率密度,因此,入射激光必须经过衰减,否则可能使图像失真,甚至损坏 CCD 接收窗口。图2为自行设计的衰减光路,光路主要由三个反射镜及镜组组成,其中, M_1 对 $1.064 \mu\text{m}$ 反射率为 85% ,对 $0.532 \mu\text{m}$ 反射率为 95.8% , M_3 为一组透镜,可视为一个凸面曲率半径均为 120.28 mm 的平凸镜, M_2 对 $1.064 \mu\text{m}$ 的反射率为 25% ,对 $0.532 \mu\text{m}$ 的反射率为 47% , M_3 对 $1.064 \mu\text{m}$ 的透过率为 0.0760% ,对 $0.532 \mu\text{m}$ 的透过率为 0.0694% 。实验证明,这样的光路可满足在非焦点位置对于 30 W 以下的调 Q 激光。

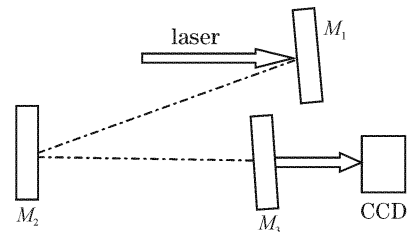
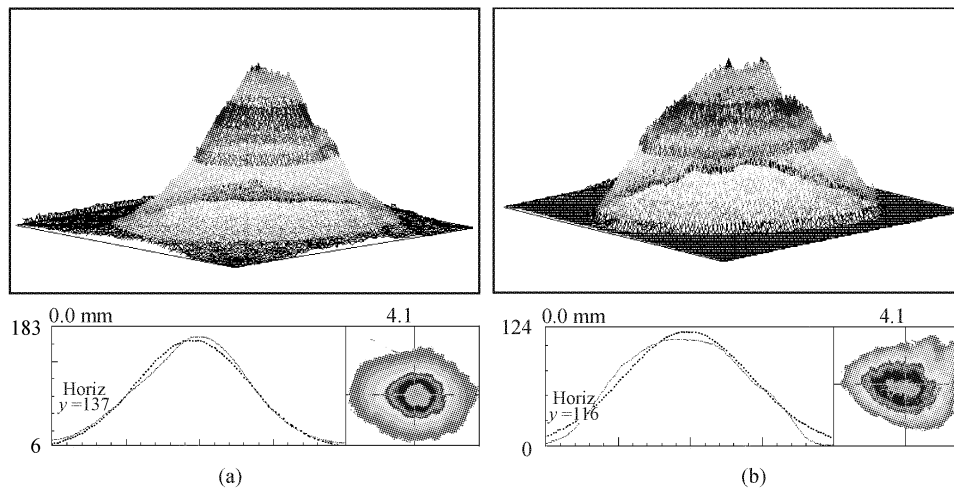


图2 光束测量实验装置

Fig.2 Experimental set-up of beam measure instrument

利用图2光路,对连续 Nd:YAG 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连续 25 W $1.064 \mu\text{m}$ 激光、倍频连续输出 2.5 W $0.532 \mu\text{m}$ 激光进行了观察,所得的结果如图3所示,实验在光传输方向的同一横截面上进行,位置大约距光束焦斑 50 mm 附近,上图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,下图为 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(a)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(b)中激光电源工作情况与图3(a)完

图 3 1.064 μm , 0.532 μm 光束质量比较(a) 连续 2.5 W 0.532 μm 激光束; (b) 连续 25 W 1.064 μm 激光束Fig. 3 Beam quality comparison between 0.532 μm laser and 1.064 μm laser(a) CW 2.5 W 0.532 μm laser beam; (b) CW 25 W 1.064 μm laser beam

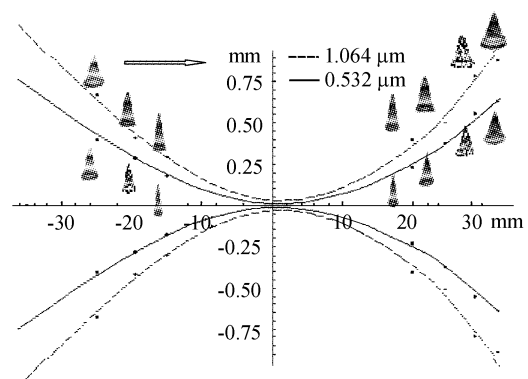
全相同,输出 1.064 μm 约为 25 W,可以看出基频光模式存在明显 TEM_{10} 模。

由此可以认为环形腔对于基频光有一定的模式选择作用,这是因为高阶模光斑较大,能量分散,功率密度低,同时环形腔对基频光的共振放大作用对基模更为明显,这是由于基模的相干性更好,基模的放大比率远大于高阶模,基模在模式竞争中明显占有优势,高阶模在环形腔中的损耗又远大于基模,因此一部分高阶模在环形腔中被滤掉。

4 倍频光与基频光聚焦情况比较

激光经过图 2 装置后,在光束传输方向的不同横截面上(焦点附近约 -35 mm, -25 mm, -20 mm, 15 mm, 20 mm, 25 mm, 35 mm 处)分别用 BEAMCODE SYS 光束质量分析仪分析光束。首先估计焦点位置,在焦点两侧取定测量位置,然后对大约 500 mW 的 0.532 μm 的环形腔倍频激光光束在各位置进行观察,然后去除倍频,对 1.064 μm 连续输出 10 W 进行观察,可以看出两种波长模式基本均为基模,根据 BEAMCODE SYS 计算机数据处理系统显示,基模所占比例均在 95% 以上。此时基频与倍频激光电源工作在同样条件,倍频激光光束光斑直径(以能量衰减到 $1/e^2$ 为标准)小于基频光,为了更方便地进行比较,利用最小二乘法,把 0.532 μm , 1.064 μm 激光用 BEAMCODE SYS 光束质量分析仪测得的光束在各个测量截面的半径为纵轴,

测量截面与光束的焦斑位置的相对距离为横轴进行双曲线拟合,分别获得两种波长激光的传输情况,并把二者拟合在同一坐标平面内,如图 4 所示,图中形象地描述了两种波长输出的传输特性。从图中可以明显看出,对于同样焦距的聚焦镜,0.532 μm 的光束要比 1.064 μm 的光束细,聚焦半径在倍频后缩小了,由拟合方程可以得到,0.532 μm 的聚焦直径约为 12.965 μm , 1.064 μm 的聚焦直径为 28.270 μm ,基本符合公式(1),(2)的描述。

图 4 0.532 μm , 1.064 μm 激光传输比较Fig. 4 Transmission comparison between 0.532 μm laser and 1.064 μm laser

从图 4 的曲线趋势可以看出,在聚焦镜入射面上,1.064 μm , 0.532 μm 的光斑直径不同,基频光的光斑直径要大于倍频光,这可能是两个因素造成的,其一是由于光程差的因素,从出射的镜片到聚焦

镜的距离看基频光大于倍频光;其二,由环形腔工作原理决定,直径较大的高阶模成分在环形腔内放大倍率低,在光学传输中高阶模的损耗大,因此,倍频后输出光光束直径减小。

为了能够进一步验证聚焦的尺寸,对基频输出 1 W(倍频输出小于 100 mW)的光束焦点附近的光斑进行了测试,图 5 为 $0.532\ \mu\text{m}$ 光束焦点附近光斑与 $1.064\ \mu\text{m}$ 在同位置测试的结果比较(可看出能量三维分布因光路调整未在中心,但仍在测试范围内,不影响测试精度)。实验结果证明,光束聚焦

大小基本与图 4 中拟合结果相吻合,但通过 BEAMCODE SYS 光束质量分析仪处理的能量分布图可以看出,测试结果存在较大的误差,处理所得的图形不是高斯形,更接近梯形,这可能因为在测试临界点,光束质量分析仪无法分辨出光束是高斯分布,还是平面波分布,中央能量分布的细微差别不能加以区分。另外,BEAMCODE SYS 光束质量分析仪的最佳测试光束直径范围为 $3.5\sim 0.03\ \text{mm}$,图 5 (b)中 $0.532\ \mu\text{m}$ 光束直径已不在最佳范围内,这也使得误差增大。

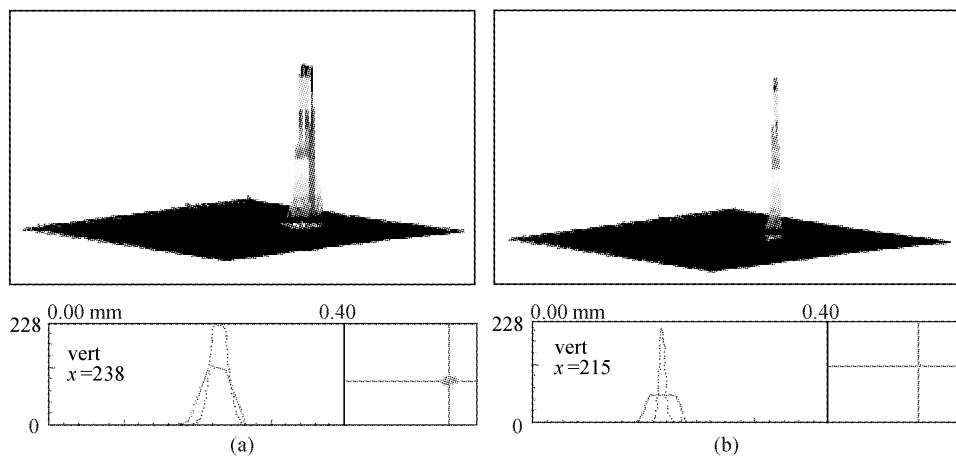


图 5 $1.064\ \mu\text{m}$ (a), $0.532\ \mu\text{m}$ (b) 光束焦点附近诊断结果

Fig. 5 Measure result near the laser focus position of $1.064\ \mu\text{m}$ (a) and $0.532\ \mu\text{m}$ (b)

5 结 论

通过实验证明环形腔倍频不会把基频光的模式变差,而且还有一定程度的优化作用;通过对光束传输的几个截面光束的测定,对连续输出基频光和倍频光光束质量、光束传输、聚焦光斑进行了对比性研究,并利用最小二乘法拟合出了光束传输曲线,对两种波长激光进行了形象的比较,并由实验数据对聚焦光斑尺寸进行了合理的估计, $0.532\ \mu\text{m}$, $1.064\ \mu\text{m}$ 激光的最小聚焦分别为 $12.965\ \mu\text{m}$, $28.270\ \mu\text{m}$,与理论很好地吻合。从而证实了“用 Nd:YAG 倍频的方法有利于精细聚焦的实现,短波长更有利于满足微成型对聚焦光斑的要求”。

参 考 文 献

1 Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Chen Jiahua *et al.*. Laser Theory [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1996. 7

周炳焜,高以智,陈加桦等. 激光理论[M]. 北京:国防工业出版社, 1996. 7

2 Jingang Liu, Dalwoo Kim. Optimization of intracavity doubled passively Q-switched solid-state lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1999, **35**(11):1724~1730

3 Susumu Konno, Tetsuo Kojima, Shuichi Fujikawa *et al.*. High-brightness 138-W green laser based on an intracavity-frequency-doubled diode-side-pumped Q-switched Nd:YAG laser [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(2):105~107

4 Y. Hadjar, F. Ducos, O. Acef. Stable 120-mW green output tunable over 2 THz by a second-harmonic generation process in a KTP crystal at room temperature [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(18):1367~1369

5 Wang Xubao, Chen Jimin, Wang Rui *et al.*. High efficiency Nd:YAG doubling frequency laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(3):203~205

王旭葆,陈继民,王 瑞等. 高转换效率 Nd:YAG 倍频激光器 [J]. 中国激光, 2003, **30**(3):203~205

6 Wang Xubao, Chen Jimin, Li Gang *et al.*. Study of frequency doubling in a KTP crystal on Q-switch Nd:YAG laser by the resonant external ring cavity [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(4):477~480

王旭葆,陈继民,李 港等. 调 Q Nd:YAG 环形腔外腔倍频技术研究 [J]. 光学学报, 2004, **24**(4):477~480