

文章编号: 0258-7025(2003)03-0203-03

高转换效率 Nd:YAG 倍频激光器

王旭葆, 陈继民, 王 瑞, 李 港, 左铁钊

(北京工业大学激光工程研究院, 北京 100022)

摘要 介绍了两种 Nd:YAG 倍频的方法: 折叠腔内倍频和腔外环形腔倍频, 并着重对腔外环形腔倍频进行了研究, 这种方法在 1 kHz 调 Q Nd:YAG 激光 50 W 平均功率输入的情况下, 获得了 17.5 W 平均功率的绿光输出, 光-光转换效率达 35%, 较好地解决了激光微细聚焦问题, 更适用于激光微成型。

关键词 激光技术; 激光烧结; 激光快速成型; 倍频; KTP 晶体

中图分类号 TN 248.1+3 **文献标识码** A

High Efficiency Nd:YAG Doubling Frequency Laser

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

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

Abstract Two kinds of frequency doubling methods by using KTP crystal are introduced. The first is frequency doubling in a folded cavity, and the second is achievement of second-harmonic generation in a resonant ring cavity. In the latter method, using an 1-kHz Q-switched Nd:YAG laser with an average power of 50 W as the input light, a green light with average power of 17.5 W and harmonic conversion efficiency of 35% is obtained. The laser used for mini-focus of laser rapid prototyping is demonstrated.

Key words laser technique; laser sintering; laser rapid prototyping; frequency doubling; KTP crystal

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。它采用激光对粉末逐层扫描加热逐层烧结,最终形成一个三维实体,未扫描部分仍然保持粉末状态,将其去除后即得所需加工零件。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,我们用调 Q Nd:YAG 激光器进行了实验和理论研究。

2 高斯光束的聚焦特性

高斯基模光束经过一个焦距为 F 的薄透镜后,由 q 参数分析的方法可得出其束腰的变换关系式^[1]

$$\frac{1}{\omega_0'^2} = \frac{1}{\omega_0^2} \left(1 - \frac{l}{F}\right)^2 + \frac{1}{F^2} \left(\frac{\pi\omega_0}{\lambda}\right)^2 \quad (1)$$

式中, ω_0' 为通过薄透镜后的束腰半径, ω_0 为物方束腰半径, l 为物方束腰与透镜的距离, λ 为光波长。

物方透镜焦平面上的光斑半径为

$$\omega_f = \frac{\lambda}{\pi\omega_0} F \quad (2)$$

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 ω_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,但是如果 ω_0 过大, F 过短会使焦深变得过小,从而不利于加工,因此,研制短波长激光器是一个有效的方案。为此对 1.064 μm 激光器进行倍频,从而获得短波长激光输出。

收稿日期: 2001-12-28; 收到修改稿日期: 2002-02-01

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(G2000067205)和北京市自然科学基金(2011002)资助项目。

作者简介: 王旭葆(1972.10—),男,黑龙江庆安人,北京工业大学激光工程研究院硕士,主要研究计算机辅助激光快速成型激光器及光路设计。E-mail: wangxubao1972@yahoo.com.cn

3 倍 频

3.1 折叠腔内倍频

图 1 是一种三镜折叠腔, $\lambda/4$ 波片和 Q 开关的运用是为了提高峰值功率和起偏, 从而提高倍频效率。KTP 晶体尺寸为 $6\text{ mm} \times 6\text{ mm} \times 12\text{ mm}$, 两边的透镜是为了把基频光聚焦在 KTP 内部, 提高光流密度, 使倍频效率提高。 M_2 对 $1.064\text{ }\mu\text{m}$ 高反同时对 $0.532\text{ }\mu\text{m}$ 高透, 这样绿光可以直接输出, 可靠性较高。精确温度控制的 KTP 晶体对基频光有 $\lambda/4$ 波片的作用, 这样基频线偏光两次经过 KTP 后变成与原偏振方向正交的线偏光, 再经过 $\lambda/4$ 波片两次后又恢复为原有的偏振方向。这时, 谐振腔中, 基频光沿着两个相反的方向行进时, 其偏振方向也是相互正交的, 这就消除了空间烧孔效应, 提高了输出光的功率稳定性, 同时还能保证入射到 KTP 晶体上的基频光永远是线偏光, 从而实现倍频效率的最大化, 既抑制了空间烧孔效应和多纵模输出, 又可以提高绿光功率和偏振度。这种方案的显著特点是阈值低, 动态工作范围宽^[2,3]。

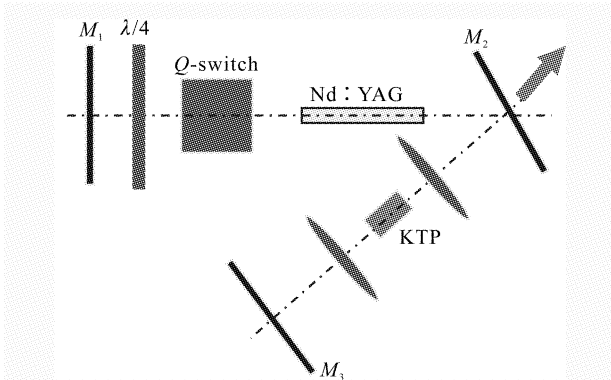


图 1 折叠腔倍频

Fig. 1 Second-harmonic generation in a folded cavity

该方案光-光转换效率 η 可用下式计算

$$\eta = \frac{P_{2\omega}}{P_{\omega}} = \tanh^2 \left[l_c K^{1/2} \left(\frac{P_{\omega}}{A} \right)^{1/2} \frac{\sin(l_c \Delta k / 2)}{l_c \Delta k / 2} \right] \quad (3)$$

$$K = 2 \left(\frac{\mu_0}{\epsilon_0 \epsilon_r} \right)^{3/2} \omega^2 d_{\text{eff}}^2 \quad (4)$$

这里 Δk 为相位失配, l_c 为非线性晶体长度, A 为基频光束面积, ω 为基频光频率, d_{eff} 为 KTP 非线性系数, ϵ_r 为 KTP 介电常数, P_{ω} , $P_{2\omega}$ 分别为基频光入射功率和倍频光出射功率, h 为普朗克常数。

实际转换效率可达到 17.3%。可以在基频平均功率为 50 W 时, 得到平均功率大约为 8.65 W 的

绿光输出。这种方案的关键在于 M_2 反射镜的选用 (它对基频光的反射率和对倍频光的透过率对倍频效果影响很大, 但又不能同时达到最优, 必须综合考虑) 和 KTP 晶体的温度控制。

3.2 腔外环形腔倍频

为了在获得高的转换效率的同时取得良好的偏振性、稳定性、单纵模, 我们采用了腔外环形腔倍频的倍频方案^[4]。如图 2 所示, 在 Nd:YAG 激光谐振腔外做一个环形腔, M_4 为绿光输出镜, 对 $1.064\text{ }\mu\text{m}$ 高反 ($R \geq 99.5\%$), 对 $0.532\text{ }\mu\text{m}$ 增透 ($T \geq 85\%$), M_2 反射镜背面粘贴一个压电陶瓷 (PZT), M_1 对 $0.532\text{ }\mu\text{m}$, $1.064\text{ }\mu\text{m}$ 高反, M_1, M_2, M_3, M_4 形成一个稳定谐振腔, 在 M_4 后 45° 放置一个绿光反射率为 95.8% 的反射镜用来分光, 透过部分经过 $\lambda/4$ 波片, 被偏振片 (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, 从而控制腔长实现锁模, 获得绿光最大增益, 单纵模稳定输出。

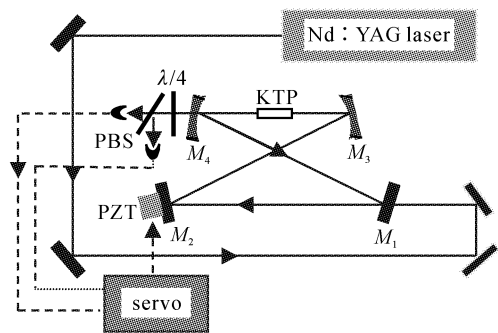


图 2 环形腔倍频

Fig. 2 Second-harmonic generation in a ring cavity

光-光转换效率可由下式计算^[5]

$$\sqrt{\eta} (T_1 + L + \sqrt{\eta P_{\omega} \eta_{\text{SHG}}})^2 = 4 T_1 \sqrt{P_{\omega} \eta_{\text{SHG}}} \quad (5)$$

T_1 为反射镜 M_1 的基频光透过率, L 为除 T_1 外的腔内一次往返总的线性损失, η_{SHG} 为无腔情况下基频光一次通过倍频晶体的倍频效率。在 L, P_{ω} 和 η_{SHG} 一定的情况下可以得出获得最大转换效率 η^0 的最佳 T_1 值

$$T_1^0 = L/2 + \sqrt{L^2/4 + P_{\omega} \eta_{\text{SHG}}} \quad (6)$$

相应的最大转换效率为

$$\eta^0 = \frac{4 \mu_{\text{SHG}} P_{\omega}}{(1 + \sqrt{1 + 4 \mu_{\text{SHG}} P_{\omega}})^2} \quad (7)$$

这里 $\mu_{\text{SHG}} = \eta_{\text{SHG}}/L^2$, 可以看出要想获得最高转换效

率就要求 $\mu_{\text{SHG}} P_{\omega} \gg (L/2)^2$, 就是非线性转换远大于线性损失, 为了缩小线性损失 L , 可以提高 P_{ω} 或 η_{SHG} , 但是这有可能伴随着不愿看到的热效应, 因此, 获得高转换效率的关键是反射镜 M_1 的参数要最优化。

这种方案在平均功率 50 W, 声光调 Q 的基频光入射时, 可获得约 35% 的光-光转换效率, 也就是获得平均功率约 17.5 W 的单模绿光输出。

这种方案的技术关键在于反射镜 M_1 和 M_4 对 1.064 μm 以及 0.532 μm 两种波长最佳反射率的选定, 和 PZT 伺服系统与声光调 Q 激光的联机调试。图 3 为应用上述方案进行激光微成型的应用实例 (两种倍频方案均可实现)。通过精细聚焦, 激光聚焦光斑可以控制在 0.01 mm 以内, 图中实际成型件的壁厚小于 0.1 mm。

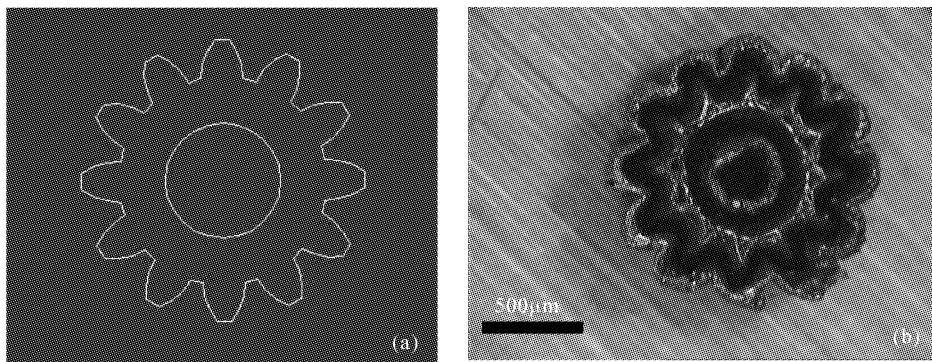


图 3 激光快速成型的精细聚焦应用实例

(a) 计算机设计的微成型; (b) 实际微成型

Fig. 3 Mini-focus application of laser rapid prototyping

(a) micro-prototyping pattern by computer; (b) actual micro prototyping

4 结 论

分析了高斯光束的聚焦特性, 提出了两种倍频方案, 并分别进行了理论分析。实践证明第二种方案的结果相对于第一种方案, 可以得到更高的转换效率, 使得倍频后的激光光束在激光烧结的实践中应用于更多种材料, 使用范围大, 可以满足微成型的需要及在激光微成型中的应用。

参 考 文 献

- 1 Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Chen Jiahua *et al.*. Laser Theory [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1996. 7 (in Chinese)
- 2 Liu Jingang, 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 G. D. Boyd, D. A. Kleinman. Parametric interaction of focused Gaussian light beams [J]. *J. Appl. Phys.*, 1968, **39** (8): 3597 ~ 3639
- 5 Y. Hadjar, F. Ducos, O. Acéf. 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