

环行倍频稳频 Nd : YAP 激光器

潘庆 张钧 张天才 李瑞宁 彭堃墀

(山西大学光电研究所, 太原 030006)

于正刚 路庆明

(山东大学化学学院, 济南 250100)

提要 采用同时满足热不灵敏与最佳倍频条件的六镜及四镜 8 字型环行谐振腔, 设计了内腔倍频稳频 Nd : YAP 激光器。六镜腔与四镜腔分别在输入 1.44 kW 和 1.2 kW 电功率的情况下, 获得了 800 mW 与 580 mW 的单频倍频光 ($\lambda = 0.54 \mu\text{m}$), 功率波动小于 $\pm 2.5\%$ 与 $\pm 2\%$, 频率稳定性优于 $\pm 1.9 \text{ MHz}$ 与 $\pm 1 \text{ MHz}$ 。

关键词 环行热稳谐振腔, α -切割 KTP 晶体, 频率稳定性

1 引言

高功率连续倍频稳频激光器是非线性光学和量子光学实验研究的重要光源。使用倍频稳频 Nd : YAG 激光器泵浦光学参量振荡腔(OPO腔), 通过参量下转换, 已获得了各类非经典光场^[1]。但是 Nd : YAG 激光器发出的 $1.064 \mu\text{m}$ 激光在 KTP 晶体内不可能实现 II 类 90° 非临界相位匹配, e_1 光与 e_2 光在倍频晶体中的光束离散(walk-off)效应, 导致倍频效率下降, 而且难以在内腔参量变换过程中实现三模共振, 我们曾采用两块 KTP 晶体串接消除光束离散^[2], 但这将不可避免地增加内腔损耗, 降低参量变换效率, 破坏光子对之间的量子相关, 从而降低输出场压缩度。而 Nd : YAP 激光晶体发出的 $1.08 \mu\text{m}$ 光波, 可在 α -切割的 KTP 晶体内实现 I 类 90° 非临界相位匹配, 晶体内的 e_1 及 e_2 光共线传输, 从而完全消除光束离散, 使倍频效率大大提高。我们通过数值计算, 选择最佳输入电功率, 设计了同时满足热不灵敏条件与最佳倍频条件的六镜及四镜 8 字型环行谐振腔, 并选择适当的倍频晶体匹配温度, 以保证倍频光输出的稳定性。六镜腔与四镜腔分别在输入电功率为 1.44 kW 与 1.2 kW 情况下, 获得了 800 mW 与 580 mW 的单频绿光 ($\lambda = 0.54 \mu\text{m}$), 功率波动小于 $\pm 2.5\%$ 与 $\pm 2\%$, 频率稳定度优于 $\pm 1.9 \text{ MHz}$ 与 $\pm 1 \text{ MHz}$ 。

2 腔型设计

采用如图 1(a), (b) 所示的六镜及四镜 8 字型环形腔, 其中 M_3, M_4 为凹面腔镜, 曲率半径

$r = 102 \text{ mm}$ 。在这两种腔型下,若将激光棒视为一个热透镜,腔内三个腰斑,最小的一个是在两个凹面镜之间的 O 平面处,取 $PM_1M_3M_3 = PM_2M_6M_4 = l_2$ (六镜腔),及 $PM_1M_3 = PM_2M_4 = l_2$ (四镜腔),则 $OM_3 = OM_4 = l_1$ 即最小腰斑在两个凹面镜正中央。

对于六镜腔取 $l_2 \approx 650 \text{ mm}$,根据以 O 平面及 P 平面为参考面的光线传输矩阵

$$\begin{pmatrix} A_o & B_o \\ C_o & D_o \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_p & B_p \\ C_p & D_p \end{pmatrix}$$

可计算出在激光棒具有不同热焦距 F_t 情况下, O 平面处的腰斑半径 w_o 与 P 平面处的光斑半径 w_p 相对于 l_1 的变化关系曲线如图 2 和 3。当激光棒的热焦距 F_t 取 740 mm (相对于输入功率 $P_{in} = 1.44 \text{ kW}^{[2]}$)时,根据激光环形腔的热不灵敏条件 $A_o + D_o = 0, A_p + D_p = 0^{[3]}$,可计算出 $l_1 \approx 51.75 \text{ mm}$,对应于满足热不灵敏条件的光斑半径分别为 $w_o \approx 0.0356 \text{ mm}, w_p \approx 0.58 \text{ mm}, w_o/w_p \approx 0.061$,与根据最佳倍频耦合条件所计算出的比值 $w_o/w_p \approx 0.058^{[4]}$ 十分接近,也就是说按以上参数设置激光谐振腔,能同时满足热不灵敏条件和最佳倍频条件,兼顾了激光器稳定运转与高效倍频的要求。

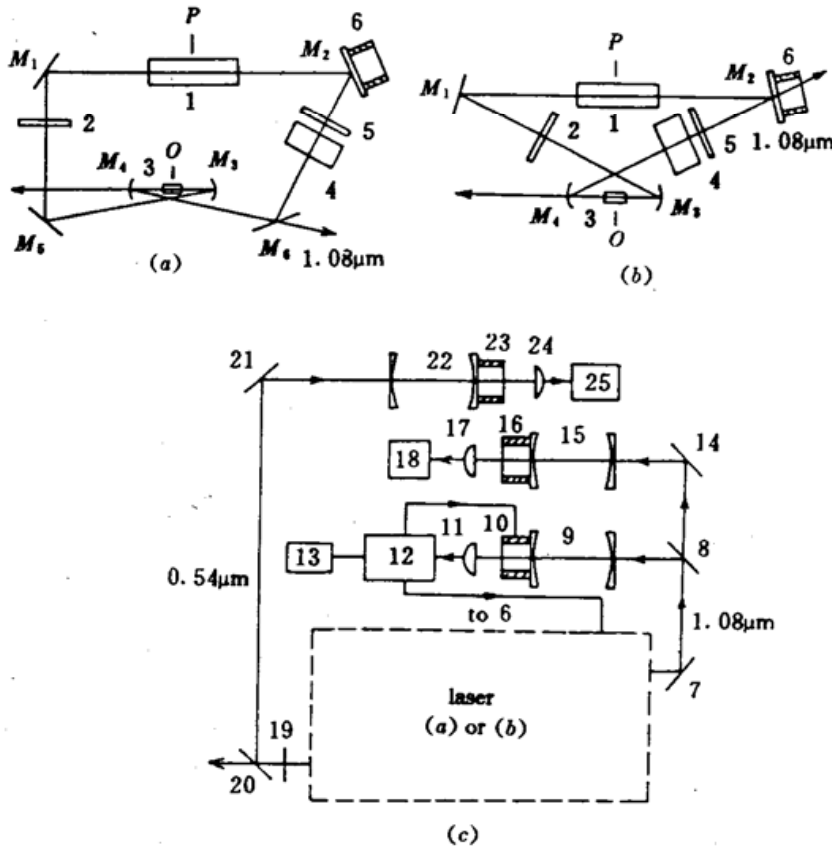


Fig. 1 The experimental setup

(a) and (b) are six-mirror and four-mirror ring cavity laser configurations respectively; (c) is the laser frequency stability measuring system, while the $1.08 \mu\text{m}$ F-P cavity (9) is served as a frequency discriminator to lock in the laser system. 1: Nd : YAP rod; 2: lens; 3: KTP crystal; 4: faraday rotator; 5: $\lambda/2$ plate; 6, 10, 16, 23: PZT; 7, 14: $1.08 \mu\text{m}$ reflector; 8: $1.08 \mu\text{m}$ beam splitter; 9: $1.08 \mu\text{m}$ F-P cavity; 11: differential detector; 12: frequency stabilization system; 13, 18, 25: oscilloscope; 15: $1.08 \mu\text{m}$ F-P₂ cavity; 17, 24: detector; 19: $0.54 \mu\text{m}$ filter; 20: $0.54 \mu\text{m}$ splitter; 21: $0.54 \mu\text{m}$ reflector; 22: $0.54 \mu\text{m}$ F-P₃ cavity

对四镜腔取 $l_2 = 800 \text{ mm}$,同样根据热不灵敏条件可取 $F_t = 800 \text{ mm}$ (相对于 $P_{in} = 1.2 \text{ kW}^{[2]}$), $l_1 = 51.2 \text{ mm}$,此时 $w_o \approx 0.0334 \text{ mm}, w_p \approx 0.70 \text{ mm}, w_o/w_p \approx 0.048$,与最佳倍频耦合

条件要求 $w_o/w_p \approx 0.058$ 亦十分接近,因此按上面选定的参数设置激光谐振腔,亦能同时满足热不灵敏条件和最佳倍频条件。

由于在光路中插入长为 10 mm、折射率为 1.7 的倍频晶体后,实际腔长缩短约 4 mm^[5],故在设计谐振腔时,应取 $M_3M_4 \approx 107.5$ mm(六镜腔)与 106.4 mm(四镜腔)。

KTP 晶体匹配温度范围较宽,我们通过实验曲线选择最佳匹配温度。用功率为 400 mW,波动小于 2% 的 1.08 μm 线偏振激光单次通过 KTP 晶体,在 50~70 $^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内每隔 0.5 $^{\circ}\text{C}$ 记录一次输出二次谐波功率,获得输出功率随温度变化关系曲线如图 4,温度在 59.5 $^{\circ}\text{C}$ 时,倍频效率最高,但对温度的变化较敏感,容易导致倍频光功率不稳定,而温度在 63.5 $^{\circ}\text{C}$ 左右时,虽然倍频效率较 59.5 $^{\circ}\text{C}$ 低一点,但对温度的变化不敏感,可得到较稳定的倍频光输出,为了保证倍频光输出的稳定性,我们选取后者。

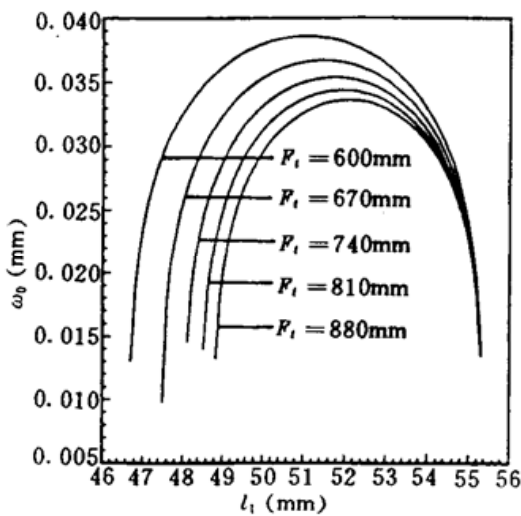


Fig. 2 The radii of TEM₀₀ mode beams in the O plane vs l_1 with different F_t ($l_2 = 650$ mm)

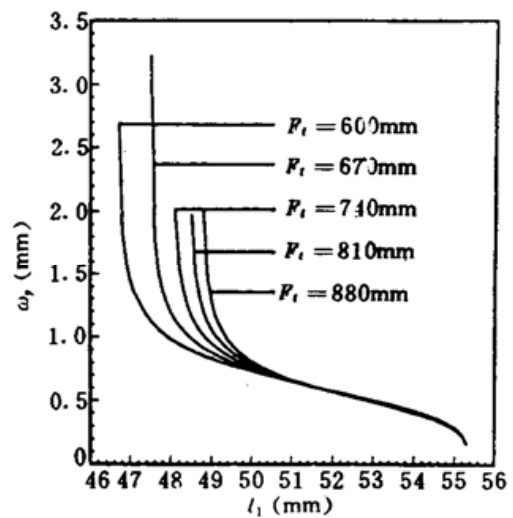


Fig. 3 The radii of TEM₀₀ mode beams in the P plane vs l_1 with different F_t ($l_2 = 650$ mm)

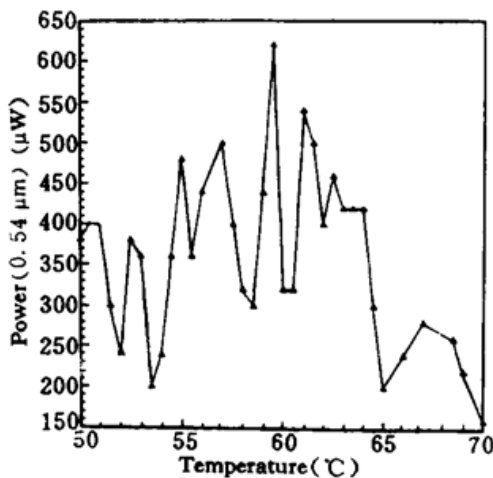


Fig. 4 The output power at 0.54 μm vs the temperature of a α -cut KTP crystal with an input power of 400 mW

3 实验装置及实验结果

3.1 六镜腔的实验装置及实验结果

实验装置如图 1 所示,在环形腔的六个腔镜中 M_1, M_2, M_5 是对 1.08 μm 光波的全反镜,但它们对 s 偏振光和对 p 偏振光的反射率不同,一般来说前者大于后者,所以我们将腔内振荡的光波选为 s 偏振^[2]; M_6 为布儒斯特腔镜; M_3, M_4 为两个凹面镜,对 1.08 μm 光波的反射率大于 99.6%,其中的 M_4 又镀有对 0.54 μm 光波的增透膜,透射率 $T > 95\%$,为倍频光输出耦合镜。激光棒及法拉第旋转器中 TGG 晶体的尺寸分别为 $\phi 3 \times 77$ mm 及 $\phi 5 \times 5$ mm。倍频晶体选用 α -切割的 KTP 晶体,两个端面均

镜有对 1.08 及 $0.54 \mu\text{m}$ 光波的双增透膜, 剩余反射率均小于 0.05% , 标准具采用厚度为 2 mm 的石英晶片。

根据图 2, 图 3 取 $l_2 \approx 650 \text{ mm}$, $M_3M_4 \approx 107.5 \text{ mm}$, 工作点选择在输入电功率 $P_{in} \approx 1.44 \text{ kW}$, KTP 晶体的温度由精密控温仪控制在 $63.5 \pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$, 将其置于 M_3M_4 的正中央。

如图 1(c), 用无源共焦腔 9 作为基频稳频系统的频率标准, 用微分探测器 11 直接获得鉴频曲线, 经过滤波、高压放大后反馈到环形腔腔镜的 PZT 上, 补偿频率跳动, 用另外两个扫描共焦腔 15 及 22 分别监视基频光及倍频光的频率跳动。将基频光锁定后, 其频率稳定度为 $\pm 0.8 \text{ MHz}$ 。

倍频光由 M_4 输出, 通过扫描的 F-P 参考腔后得到的透射峰照片如图 5(a), 腔的自由光谱范围亦为 735 MHz , 因此示波器上 1 ms 对应 37.7 MHz , 图 5(b) 表示倍频光单频自由跳动为 38 MHz , 将基频光的频率锁定后, 倍频光单频跳动如图 5(c), 为 3.8 MHz 。故倍频光频率稳定度优于 $\pm 1.9 \text{ MHz}$ (时间大于 2 min)。

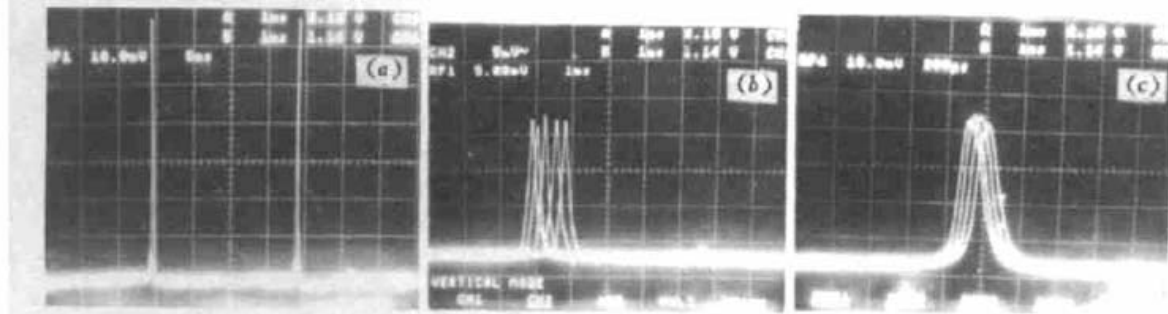


Fig. 5 Measured results obtained by a scanning F-P method shown in Fig. 1 (c)

(a) shows the 6-mirror laser output transmission at $0.54 \mu\text{m}$ obtained by scanning the F-P cavity; (b) shows mode hopping when the 6-mirror laser cavity is unlocked, and (c) is the case in which the 6-mirror cavity keeps locked

3.2 四镜腔的实验装置及实验结果

实验装置如图 1 所示, 在环形腔的四个腔镜中 M_1 , M_2 是对 $1.08 \mu\text{m}$ 光波的全反镜; M_3 , M_4 的参数分别与六镜腔的 M_3 、 M_4 相同, 激光晶体、单向器、标准具均与六镜腔所用的一致。

取 $l_2 \approx 800 \text{ mm}$, $M_3M_4 \approx 106.4 \text{ mm}$, 工作点选择在输入电功率 $P_{in} = 1.2 \text{ kW}$, KTP 晶体亦被置于 M_3M_4 的正中央, 基频光的频率锁定后, 其稳定度为 $\pm 0.9 \text{ MHz}$, 倍频光频率稳定度优于 $\pm 1 \text{ MHz}$ (时间大于 10 min)。

综上所述我们在同时满足热不灵敏条件与最佳倍频条件下设计了六镜及四镜环形内腔倍频稳频 Nd:YAP 激光器, 通过选定最佳输入电功率, 获得了高功率、高稳定度的倍频光输出。六镜腔输出功率高于四镜腔, 但稳定度略差。

参 考 文 献

- 1 彭堃焯, 黄茂全, 刘 晶等. 双模压缩态光场的实验研究. 物理学报, 1993, 42(7): 1079~1085
- 2 潘 庆, 张 钧, 侯占佳等. 环行稳频 Nd:YAP 激光器. 中国激光, 1995, A22(10): 731~734
- 3 彭 焯, 李瑞宁, 黄茂全等. 稳频环行 Nd:YAG 激光器. 中国激光, 1989, 16(8): 449~451
- 4 A. 雅里夫著, 李宗琦译. 光电子学, 第一版. 北京: 科学出版社, 1983. 923
- 5 吕百达著. 激光光学. 成都: 四川大学出版社, 1986. 29

Frequency-stabilized and Frequency-doubled Ring Nd : YAP Laser

Pan Qing Zhang Jun Zhang Tiancai Li Ruining Peng Kunchi

(*Institute of Opto-Electronic of Shanxi University, Taiyuan 030006*)

Yu Zhenggang Lu Qingming

(*Shandong University, Chemistry College, Jinan 250100*)

Abstract Frequency-stabilized and frequency-doubled ring Nd : YAP lasers with a 6-mirror cavity or a 4-mirror cavity have been demonstrated. The designed lasers satisfy conditions both of thermal insensitivity and of optimum frequency-doubling. The second-harmonic output powers up to 800 mW and 580 mW with the intensity fluctuations less than $\pm 2.5\%$ and $\pm 2\%$ as well as the long-term frequency stabilities better than ± 1.9 MHz and ± 1 MHz have been obtained respectively for the 6-mirror cavity with an input electric power of 1.44 kW and the 4-mirror cavity with an input electric power of 1.2 kW.

Key words thermally insensitive ring cavity, α -cut KTP crystal, frequency stability