

连续 Nd:YAG 稳频倍频激光器*

薛江瑞 张小虎 李 军 彭堃墀

(山西大学光电研究所, 030006)

蒋德华

(山东大学化学系, 250100)

摘要: 在连续稳频 Nd:YAG 激光器的基础上, 重新设计了腔形, 使用角度匹配的 KTP 和 MgO:LiNbO₃ 晶体倍频。在输入功率为 2.5 kW 时, 获得基频光 800 mW 输出, 强度波动小于 2%, 频率稳定性优于 2 MHz。同时获得 50~100 mW 的倍频光输出, 强度波动小于 5%, 频率稳定性优于 5 MHz。

关键词: 稳频倍频激光器, 频率稳定性

Frequency stabilized and doubled Nd:YAG CW laser

Gao Jiangrui, Zhang Xiaohu, Li Jun, Peng Kunchi

(Research Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan)

Jiang Dehua

(Chemistry Department, Shandong University, Jinan)

Abstract: A frequency stabilized and doubled Nd:YAG laser was designed based on our frequency stabilized laser. The configuration of cavity was recalculated. Both KTP and MgO:LiNbO₃ were used for frequency doubling and the method of angular match was chosen. The output powers of 800mW and 50~100 mW were obtained respectively for the fundamental (1.06 μ m) and second harmonic generation (0.53 μ m) using a pumping power of 2.5kW. The intensity fluctuations were less than 2% for the 1.06 μ m wave and 5% for 0.53 μ m wave. The frequency stability at 1.06 μ m and 0.53 μ m signal-frequency laser output were respectively better than 2MHz and 5MHz.

Key words: frequency stabilized and doubled laser, frequency stability

一、引 言

连续 Nd:YAG 稳频倍频激光器是研究量子光学和非线性光学有关问题的一个重要光源。利用此光源泵浦 OPO 腔(光参量振荡器), 进行简并参量下转换, 可获得目前最大压缩比的单模光场压缩态^[1]。当提高此激光器的倍频输出, 使输入 OPO 腔的倍频光泵浦达 50 mW 以上, 则可进行量子位相相干性及量子非破坏测量^[2](QND)等重要基础实验研究。当然光源的稳定性及输出光束的质量对实验结果有着十分关键的作用。

收稿日期: 1990年9月17日。

* 山西省科委资助项目。

一般来讲, 采用内腔倍频的方法可获高的倍频光输出。文献[3]中报道了在驻波腔 YAG 激光器中放入 $\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{NO}_{15}$ 晶体, 并采取一定措施后, 在输入功率为 800 W 时, 获得 0.3~0.5 W 的倍频光($0.53\ \mu\text{m}$)单频输出, 当输出为 300 mW 时频率稳定度为 120 MHz(1 min)。最近, R. L. Byer^[4]等人使用二极管泵浦 YAG 环行激光器, 利用 $\text{Mg}:\text{LiNbO}_3$ 腔外倍频获得高转换效率的 $0.53\ \mu\text{m}$ 单频输出, 输出功率为 29.7 mW。

我们在原有连续 YAG 环行稳频激光器工作基础上^[5], 重新安排设计腔形, 分别放入 KTP 和 $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ 晶体进行腔内倍频, 获得倍频光稳定单频输出功率为 50~100 mW, 在输出 50 mW 时, 频率稳定度 $<5\ \text{MHz}$ (0.5 min 以上), 用此光源可进行光场压缩态及有关问题的研究。

二、设计原理

我们使用连续 Nd:YAG 环行稳频激光器, 如图 1 所示, 在输入功率为 2.2 kW 时, 单频输出 3 W, 频率稳定度为 1 MHz。 M_3 镜为 $1.06\ \mu\text{m}$ 输出镜, 由于我们选择 M_1 镜为倍频光($0.53\ \mu\text{m}$)输出镜, 故倍频晶体放置位置只能在 $\overline{M_4M_1}$ 臂之内移动。在对倍频晶体作了严格选择后, 对腔形设计有如下两个要求: (1) 腔内基频光光束腰斑应位于 $\overline{M_4M_1}$ 臂内; (2) 基频光束腰斑控制在 $90\ \mu\text{m}$ 左右。

根据上述要求, 在腔中插入镀有对 $1.06\ \mu\text{m}$ 高增透的透镜, 通过选择不同焦距和改变透镜相对于 YAG 棒中心的距离来调节和控制高斯光束腰斑的位置和大小, 使得到最佳的倍频光输出。

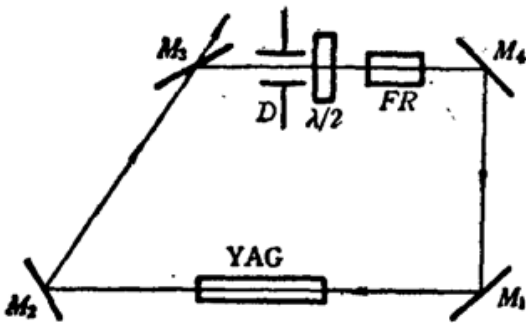


Fig. 1 Schematic diagram of a ring cavity laser

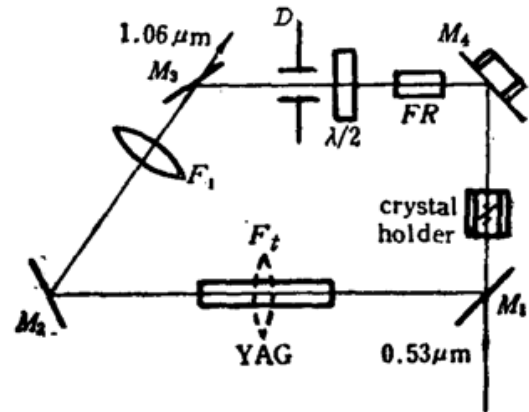


Fig. 2 Schematic diagram of a ring frequency-doubled single-frequency Nd:YAG laser

如图 2 所示, 环行腔总长为 L , F_1 为插入透镜 f_1 的焦距, F_t 为在一定输入功率下 YAG 棒的等效热透镜 f_t 的焦距, $f_t M f_0$ (f_t 经 M_2 到 f_1 的距离) 为 D 。在薄透镜近似下, 可将 f_t 和 f_1 作为一个焦距为 F 组合透镜, 如图 3 所示, 其有关参数如下:

$$F = \frac{F_t F_1}{F_t + F_1 - D} \quad (1)$$

物像空间主点分别为

$$O_t H_t = \frac{F_t D}{F_t + F_1 - D} \quad (2)$$

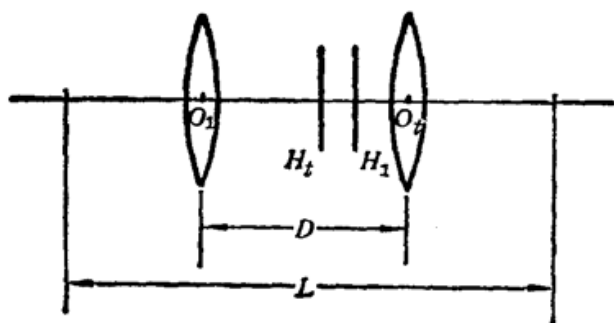


Fig 3. Schematic diagram of an equivalent thin-lens sequence

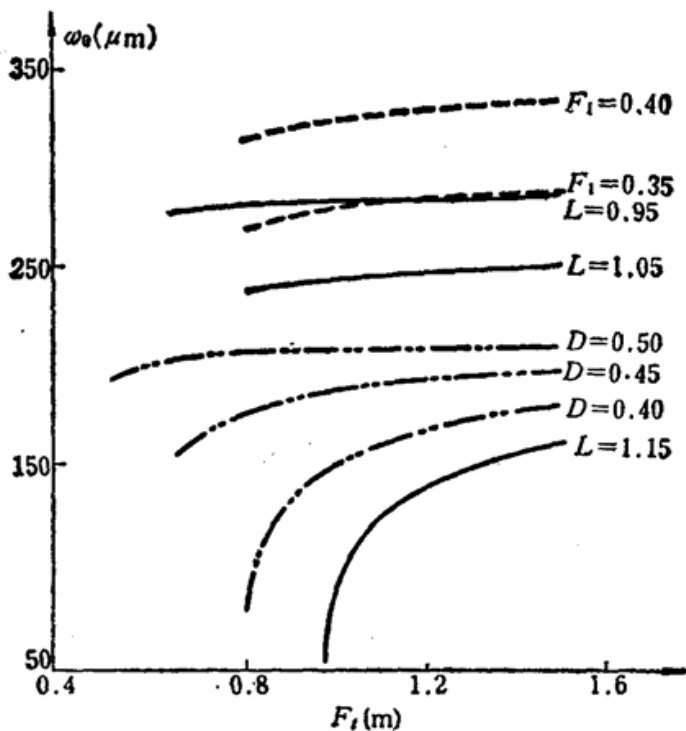


Fig 4. Curve of ω_0 vs F_1 for difference cases
 - - - - - $L=114$ cm, $F_1=30$ cm, for $D=50$ cm, 45 cm, 40 cm;
 — $D=39$ cm, $F_1=30$ cm, for $L=95$ cm, 105 cm, 115 cm;
 ····· $L=114$ cm, $D=40$ cm for $F_1=40$ cm, 35 cm

$$O_1H_1 = \frac{F_1 D}{F_t + F_1 - D} \quad (3)$$

两主面间距

$$H_1H_2 = D - O_tH_t + O_1H_1 \quad (4)$$

由高斯成像公式知

$$\frac{1}{\omega_0'^2} = \frac{1}{\omega_0^2} \left(1 - \frac{l}{F}\right)^2 + \frac{1}{F^2} \left(\frac{\pi \omega_0}{\lambda}\right)^2 \quad (5)$$

l 为入射光腰斑到 H_1 的距离, l' 为 H_2 到出射光束腰斑 ω_0' 的距离, F 为组合透镜的焦距。要求环行腔位形必须满足以下自洽条件:

$$l = l', \quad \omega_0 = \omega_0' \quad (6)$$

$$l = l' = \frac{1}{2}(L - H_1H_2) \quad (7)$$

整理上述讨论可得

$$\frac{\pi \omega_0^2}{\lambda} = (2Fl - l^2)^{1/2} \quad (8)$$

由(8)式的计算机计算结果可知,在不同的 L 、 f 及 D 的情况下, ω_0 与 F_1 之间的变化关系如图 4 所示。

通过上述讨论分析知道,在保持谐振腔处于稳定区的前提下, F_1 选用 30 cm, $L \approx 114$ cm, $D \approx 40$ cm 是一组最优参数选择。

三、实验装置及实验结果

实验装置如图 5 所示,环行腔总长为 114 cm, YAG 棒直径为 3 mm, 长 75 mm。 M_1 、 M_2

及 M_4 皆为反射率(对于 $1.06\ \mu\text{m}$)大于 99.7% 平面镜。起偏镜 M_3 对于 S 偏振的反射率大于 99% , 对于 P 偏振反射率为 0.5% 。法拉第旋转器(F-R)使用直径为 $3\ \text{mm}$ 、长为 $50\ \text{mm}$ 的优质石英棒。插入透镜 f_1 的焦距为 $30\ \text{cm}$, 两面镀有 $1.06\ \mu\text{m}$ 增透膜, 距离 YAG 棒中点位置约 $40\ \text{cm}$ 。装有角度匹配的 KTP 或 $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ 晶体的晶体架放置在 M_4M_1 臂之间。F-P₁(法布里-珀罗腔)作为基频光($1.06\ \mu\text{m}$)输出的鉴频器, 与稳频电路配合用于稳定激光器的基频光频率^[5], F-P₂腔作为倍频光($0.53\ \mu\text{m}$)输出鉴频器, 此腔由一片曲率半径为 $5\ \text{cm}$ (对 $0.53\ \mu\text{m}$ 透射率为 3% , 对 $1.06\ \mu\text{m}$ 为全反)的反射镜和另一片曲率半径为 $10\ \text{cm}$ (对 $0.53\ \mu\text{m}$ 全反, 对 $1.06\ \mu\text{m}$ 透射率为 4%)的反射镜构成, 腔的位形为共心腔。F-P₃腔是用于监视 $1.06\ \mu\text{m}$ 输出的频率变化。 A_1 、 A_2 、 A_3 和 A_4 分别为 1.06 和 $0.53\ \mu\text{m}$ 的滤光片。探

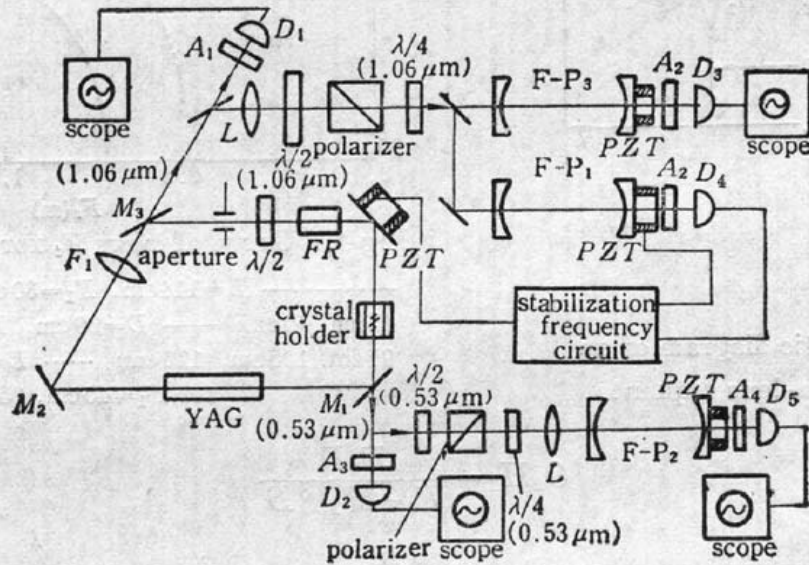


Fig. 5 Experimental setup

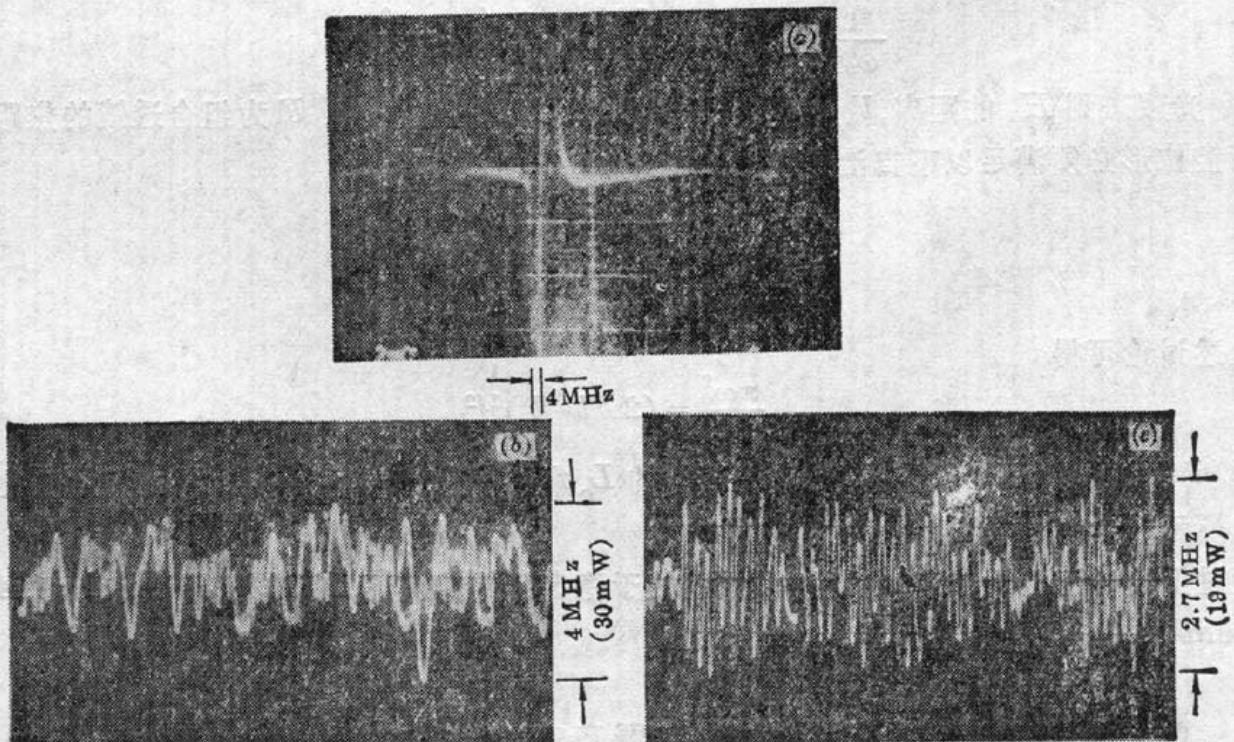


Fig. 6 (a) curve of frequency discrimination; (b) Photograph of unlocking; (c) Photograph of locking

测器 D_1 和 D_2 分别用于监视 1.06 及 $0.53\mu\text{m}$ 输出的强度波动,可用记录仪记录。 D_4 是双探测器。F-P 腔前的偏光棱镜和 $\lambda/4$ 波片构成隔离器。光路中的透镜是用于模匹配的。

当输入功率为 2.5kW 时,基频光 ($1.06\mu\text{m}$) 由 M_3 镜输出 800mW , 强度起伏小于 2% , 其频率稳定性为 $1.7\sim 2\text{MHz}$ 。图 6(a) 为自由光谱范围为 750MHz 的 F-P₁ 腔所得到的鉴频曲线, 峰峰值间频率宽度为 4MHz 。图 6(b) 为失锁状态下共焦腔 F-P₁ 的透射强度照片。透射强度最大振幅相应于鉴频曲线峰值之间的频率宽度。故图 6(c) 表示锁定后透射强度最大振幅所对应的频率宽度为 2.7MHz 。因之, 稳频倍频激光器的基频光频率稳定度为 1.5MHz 。

在稳定基频光的频率情况下, 由 M_1 镜输出倍频光 ($0.53\mu\text{m}$) 通过 F-P₂ 腔。图 7 表示 F-P₂ 腔扫描得到透射峰照片, 腔的自由光谱范围为 1000MHz , 因此示波器上 1ms 对应于 59MHz 。

图 8(a) 表示倍频光单频自由跳动 77MHz (大于 1min)。图 8(b) 表示基频光锁定后,

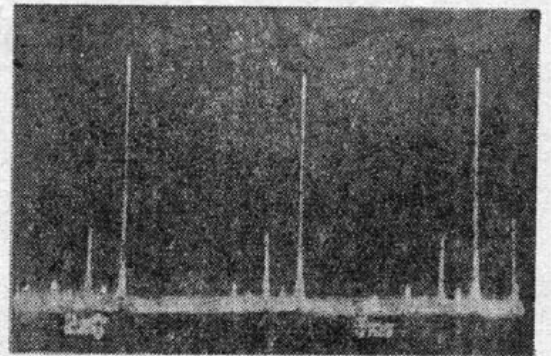


Fig. 7 Photograph of the transmission of $0.53\mu\text{m}$ wave through scanning F-P₂ cavity

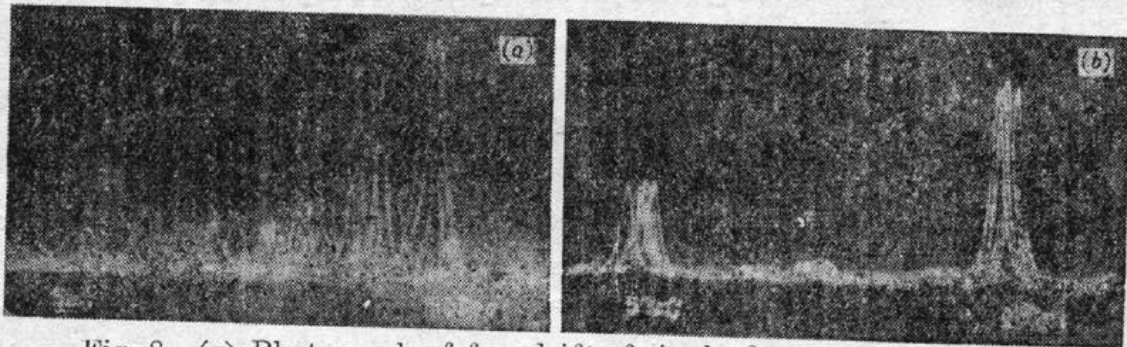


Fig. 8 (a) Photograph of free drift of single-frequency ($0.53\mu\text{m}$); (b) Photograph of the scanning F-P₂ cavity ($0.53\mu\text{m}$) display of the frequency stability of frequency-doubled laser output

倍频光单频跳动 $\sim 9\text{MHz}$, 故倍频光频率稳定性小于 5MHz 。其强度起伏小于 5% 。

感谢西南技术物理所提供的 $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ 晶体, 感谢山东大学化学系提供的 KTP 晶体。对加州理工学院 J. Kimble 教授赠送给我们在实验中使用的光学元件表示衷心感谢。

参 考 文 献

- 1 L-A Wu, H. J. Kimble *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **57**, 2520 (1986)
- 2 S. F. Pereira, 彭堃焯 *et al.*, Presented at the Sixth Rochester Conference on Coherence and Quantum Optics, Rochester New York, June, 26~28 (1989)
- 3 William Culshaw, J. Kannelaud *et al.*, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-10** (2), 253~263 (1974)
- 4 William J. Kozhovsky, C. D. Nabors *et al.*, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-24** (5), 913~919 (1988)
- 5 彭堃焯 *et al.*, 中国激光, **16** (8), 449~451 (1989); 彭堃焯, Lin-An Wu, J. Kimble, *Appl. Opt.*, **24** (7), 938~940 (1985)