

环行稳频 Nd:YAP 激光器

潘庆 张钧 侯占佳 李瑞宁 彭堃捍

(山西大学光电研究所, 太原 030006)

提要 采用四镜环行谐振腔,通过正确选择 Nd:YAP 棒的方位,提高了内腔激光偏振度,降低了热效应的影响,在输入 1.2 kW 电功率的情况下,输出单频激光功率为 1.2 W,波动小于 2%,频率的长期稳定性小于 ± 0.4 MHz。

关键词 四镜环行谐振腔, Nd:YAP 激光棒, 频率稳定性

1 引言

连续高输出稳频 Nd:YAP 激光器是研究非线性光学和量子光学问题的一个重要光源。在参量变换过程中, KTP 晶体的非线性系数大, 温度范围宽, 可接收角度大, 吸收小, 是目前光转换效率较高的非线性晶体, 以前人们用它作为 Nd:YAG 激光(1.064 μm)的倍频晶体^[1], 但由于 1.064 μm 光波的 e_1 光和 e_2 光在 KTP 晶体中的离散(walk-off)效应, 致使倍频效率下降, 而 Nd:YAP 激光晶体发出的 1.0795 μm 光波, 可在 α -切割的 KTP 晶体内实现 II 类 90°非临界相位匹配, 从而完全消除光束离散, 使倍频效率大大提高, 引起了人们的关注, 使用这种激光器输出的光波进行外腔谐振倍频, 可获得 85%的倍频效率^[2]。我们研制出的稳频 Nd:YAP 激光器, 输出功率为 1.2 W, 波动小于 2%, 频率的长期稳定性优于 ± 0.4 MHz。

2 设计原理

图 1 为沿 b 轴方向拉制的 Nd:YAP 棒的荧光光谱图, 由于 Nd:YAP 晶体属光学负双轴晶体^[3], 空间群为 $D_{2d}^6 - P6_{3m}$, 它在 c 轴方向和 a 轴方向发射的荧光光谱是不同的, 偏振方向平行于 c 轴的荧光光谱以 1.0795 μm 谱线为最强, 偏振方向平行于 a 轴的荧光光谱以 1.0645 μm 谱线为最强, 但前者比后者要强得多, 所以在自由状态下激光器一般是 1.0795 μm 谱线起振^[4], 而 45°入射的全反镜的膜层对 s 偏振光和对 p 偏振光的反射率是不同的, 一般来说前者大于后者。所以应将 Nd:YAP 棒的 c 轴方向调整至与环行腔的 s 偏振方向一致, 以保证谐振腔内振荡的 1.0795 μm 光波为 s 偏振, 并且设法增加 p 偏振光的损耗, 以抑制其起振, 这样激光器将以偏振很纯的 s 偏振光振荡, 再插入由 $\lambda/2$ 波片和法拉第旋转器 (TGG) 组成的光二极管, 激光器即可实现单向运转, 如果激光晶体的 c 轴与 p 偏振方向一致, 不仅偏振度很低, 而且不能实现单向运转。这一点与各向同性的 Nd:YAG 激光晶体大不相同, 实验中需特别注意。

图 2 为我们测的 b 轴 Nd:YAP 晶体的热焦距与输入电功率的关系曲线, 曲线 1 为 c 轴平

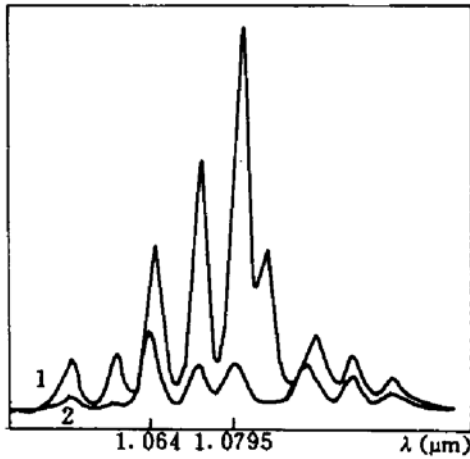


Fig. 1 Polarized fluorescence spectra in a *b*-axis Nd:YAP laser rod
1: *c* polarization; 2: *a* polarization

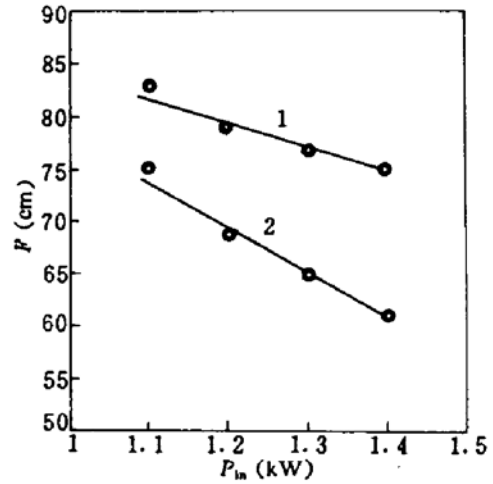


Fig. 2 Thermal focal lengths of *b*-axis Nd:YAP rod at *c* direction vs the input power
1: *c* axis is parallel with the long axis of the ellipse cavity;
2: *a* axis is parallel with the long axis of the ellipse cavity

行于聚光腔的长轴时, *c* 偏振光的热焦距, 曲线 2 为 *a* 轴平行于聚光腔的长轴时, *c* 偏振光的热焦距。根据参考文献[4], 也由我们实测的热焦距图可知, 由于 Nd:YAP 晶体的各向异性, 导致晶体晶轴在聚光腔中的方位不同时, 表现出来的热效应不同, 当 *c* 轴平行于聚光腔的长轴时, Nd:YAP 晶体在 *c* 轴方向上的热焦距较长。因此, 应将 Nd:YAP 晶体的 *c* 轴准确调整至与聚光腔的长轴平行, 使激光棒在 *c* 轴方向有较长的热焦距, 以保证激光谐振腔在较大的输入电功率时仍为稳定腔。

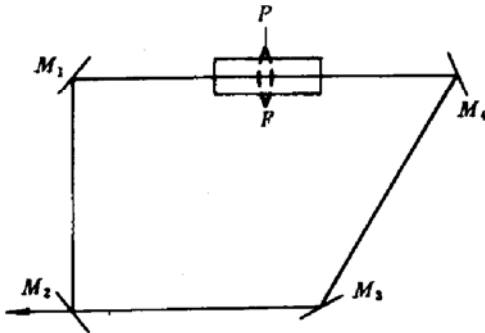


Fig. 3 A ring cavity with 4 flat mirrors

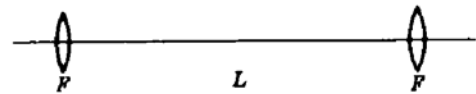


Fig. 4 The thin lens succession equivalent to the ring cavity shown in Fig. 3

图 3 为激光器光路图, 图 4 为其以 *P* 平面为参考平面的等价薄透镜序列, 其传输矩阵为

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/F & 1 \end{pmatrix}$$

$$A = 1 - L/F, \quad B = L, \quad C = -1/F, \quad D = 1$$

基模光束在激光棒中心的半径为

$$\omega = \sqrt{\frac{2\lambda|B|}{\pi\sqrt{4 - (A + D)^2}}}$$

图 5 为选不同腔长和不同的热焦距时, 基模光束在激光棒中心的半径, 根据自孔径选模条

件,我们可以选取合适的环行腔总腔长和对应的泵浦功率。

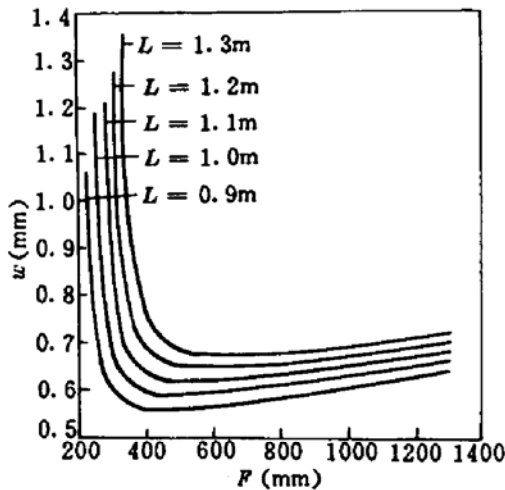


Fig. 5 The radii of TEM₀₀ mode beams in the laser rod vs thermal focal lengths at different cavity length L

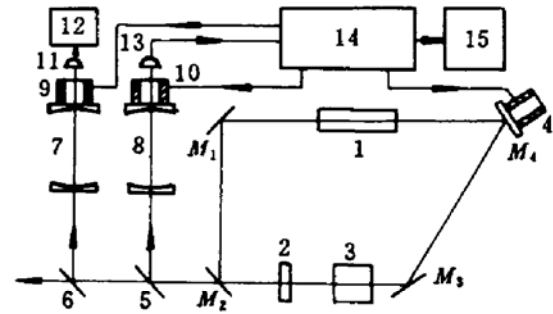


Fig. 6 The experimental setup

1: Nd:YAP rod; 2: $\lambda/2$ plate; 3: Faraday Rotator; 4, 9, 10; PZT; 5, 6: Beam splitter; 7, 8: F-P cavity; 11: Detector; 12, 15: Oscilloscopes; 13: Differential detector; 14: Frequency stabilization system

3 实验装置及实验结果

实验装置如图 6 所示,环行腔的四个谐振腔镜中, M_1 , M_4 是对 $1.0795 \mu\text{m}$ 光波的全反镜,但它们对 s 偏振光和对 p 偏振光的透射率是不同的,前者 $T < 0.04\%$,后者 $T \approx 0.5\%$, M_3 为一个布儒斯特偏振腔镜,对 s 偏振光的反射率大于 99.95% ,对 p 偏振光的反射率小于 8% ,输出镜 M_2 对 s 偏振光的透射率为 4% ,对 p 偏振光的透射率为 20% 。激光晶体 Nd:YAP 棒的尺寸为: $\phi 3 \times 77 \text{ mm}$,法拉第旋转器中 TGG 晶体的尺寸为 $\phi 5 \times 5 \text{ mm}$,我们使用的磁场对 $1.0795 \mu\text{m}$ 偏振光可旋转 1.87° , $\lambda/2$ 波片的材料为石英晶体,它们的两个端面均镀对 $1.0795 \mu\text{m}$ 光波的增透膜,剩余反射率均小于 0.05% 。将激光头调整至使 c 轴方向与环行腔内 s 偏振光方向严格平行,误差小于 $\pm 0.5^\circ$,保证谐振腔内振荡的 $1.0795 \mu\text{m}$ 光波为较纯的 s 偏振。为了使激光棒具有较长的热焦距,我们调整激光棒在聚光腔中的方位,使 Nd:YAP 晶体的 c 轴与聚光腔的长轴平行,误差亦小于 $\pm 0.5^\circ$ 。谐振腔光路中间插入由 $\lambda/2$ 波片和法拉第旋转器组成的单向器,这样不仅激光器的双向输出比大于 $2000:1$,而且谐振腔在较大的输入电功率情况下仍处于稳定区。

我们将工作点选择在输入电功率 $P_{in} = 1.2 \text{ kW}$,由图 2 可知激光棒的热焦距为 $F = 800 \text{ mm}$,根据激光环行腔的热不灵敏条件 $A + D = 0^{[5]}$,可计算得腔长为 $L \approx 1.6 \text{ m}$,但按自孔径选模条件的要求,即基模光束在激光棒中的半径应为激光棒半径的二分之一,环行腔长应为 $L \approx 1.1 \text{ m}$,我们综合考虑热不灵敏条件及自孔径选模条件,尔后实验确定最佳腔长为 1.1 m ,此时激光器可以输出稳定的单频光波。理论预估与实验结果误差主要来源于对激光棒热焦距的测量误差及将激光棒近似等效于一个薄透镜等问题。

稳频系统的频率标准采用无源共焦腔,用微分探测器直接获得鉴频曲线,经过滤波、高压放大反馈到环行腔腔镜的 PZT 上,补偿频率的跳动,用另外一个扫描共焦腔监视模式和频率的跳动^[5]。参考腔和监视腔均是由两个曲率半径 $r = 102.09 \text{ mm}$,反射率 $R = 99.5\%$ 的凹面镜

组成的共焦腔,自由光谱区为 735 MHz。

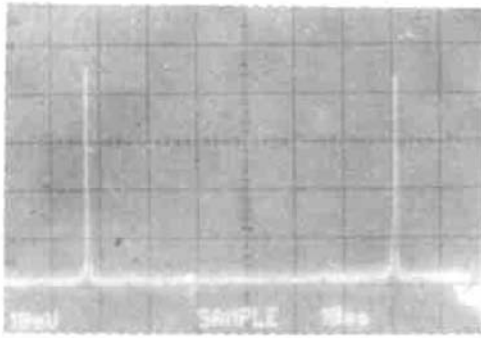


Fig. 7 Shows the transmission of 1.0795 μm wave through the scanning F-P cavity

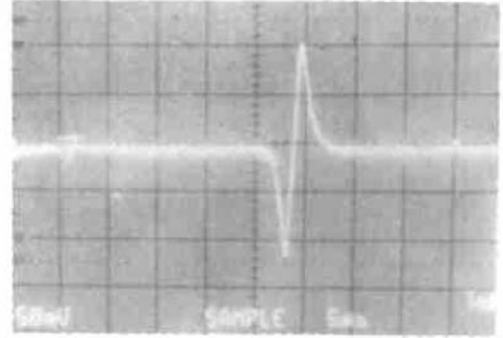


Fig. 8 The curve of frequency discrimination

实验结果: 激光器在输入电功率为 1.2 kW 时,单频输出功率为 1.2 W,功率波动小于 2%。输出激光模式如图 7,参考腔的自由光谱区为 735 MHz。所以示波器上每毫秒对应 11.7 MHz。鉴频曲线如图 8,峰峰值之间为 1.5 ms, 220 mV,对应激光器在自由状态的频率跳动为 17.55 MHz。我们将稳频器、激光器闭环锁定,调整增益和时间常数,得到锁定后的频率跳动如图 9 所示,频率跳动对应的电压波动范围小于 10 mV,

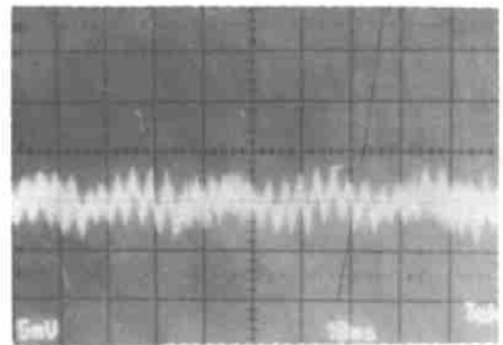


Fig. 9 Frequency fluctuation with the cavity locked-in

由此可算出对应的频率稳定精度为 ± 0.4 MHz(峰-峰值, 10 min)。

参 考 文 献

- 1 郜江瑞, 张小虎, 李 军等. 连续 Nd:YAG 稳频倍频激光器. 中国激光, 1991, 18(10):721~725
- 2 Z. Y. Ou, S. F. Pereira, E. S. Polzik *et al.*. 85% efficiency for cw frequency doubling from 1.08 to 0.54 μm . *Opt. Lett.*, 1992, 17(9):640~642
- 3 G. A. Massey. Measurements of device parameters for Nd:YAlO₃ laser. *IEEE J. of Quant. Electr.*, 1972, QE-8(7):669~674
- 4 沈鸿元, 周玉平, 于桂芳等. 热效应对高功率 b 轴 Nd:YAP, Nd+Cr:YAP 连续激光器输出的影响. 物理学报, 1982, 31(9):1235~1242
- 5 彭望璋, 李瑞宁, 黄茂全等. 稳频环形 Nd:YAG 激光器. 中国激光, 1989, 16(8):449~451

Frequency-stabilized Ring Nd:YAP Laser

Pan Qing Zhang Jun Hou Zhanjia Li Ruining Peng Kunchi

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

Abstract By using a 4-mirror ring cavity and choosing the appropriate direction of the Nd:YAP rod, the laser polarizability and the influence of the thermal effect on laser inside the cavity have been improved. The single frequency output up to 1.2 W has been obtained with the input power of 1.2 kW, the fluctuation is less than 2%, and the long term frequency stability is better than ± 0.4 MHz.

Key words 4-mirror ring cavity, Nd:YAP laser rod, frequency stability