

# 全固化非平面单频 Nd:YAG 环形激光器\*

张宽收 张 云 谢常德 彭莜桦

(山西大学光电研究所, 太原 030006)

**摘 要** 利用 Nd:YAG 激光增益介质的法拉第效应, 以及光束在非平面环形谐振腔中传播产生的偏振面旋转, 使激光二极管泵浦的环形 Nd:YAG 激光器单向运转, 获得单频激光输出。最大单纵模激光(1.064  $\mu\text{m}$ )输出为 365 mW, 功率波动小于 2%, 短期频率漂移小于 45 MHz。并利用内腔倍频技术得到单频绿光输出, 最大单纵模绿光(532 nm)输出为 75 mW, 功率波动小于 4%。

**关键词** 全固化, 非平面, 单频激光器。

早期, 人们设计出单块非平面环形激光器<sup>[1~3]</sup>, 这种单块谐振腔设计可以获得窄线宽、超稳定的单频激光输出。但人们逐渐发现由分离元件组成的环形激光器亦有其不可比拟的优点。可以在谐振腔中插入各种元件, 使激光器以不同方式运转, 例如在腔内插入倍频晶体得到倍频单频激光输出。首先, Harrison 等<sup>[4]</sup>用铽镓石榴石(TGG)晶体作为法拉第旋转器, 使激光器单向运转, 得到单频激光输出, 但此方法腔内元件较多, 损耗较大, 影响效率的进一步提高。接着, Scheps 等<sup>[5]</sup>及 Maker 等<sup>[6]</sup>分别用 Nd:YAG 增益介质自身作为法拉第旋转器, 并将 Nd:YAG 晶体以特殊方式切割与两个腔镜组成非平面谐振腔, 得到单频环形激光器, 最大单频激光输出分别为 493 mW 和 190 mW, 斜效率分别为 13% 和 42%, 在降低内腔损耗的基础上使效率得到提高, 但此方法晶体切割比较特殊, 谐振腔调节要求严格, 限制了它的进一步推广应用。

本文利用 Nd:YAG 激光增益介质的法拉第效应产生的光束偏振方向同向旋转及由四个腔镜组成的非平面环形谐振腔所产生的光束偏振方向反向旋转, 使激光二极管泵浦的环形 Nd:YAG 激光器单向运转, 得到单频红外激光输出。并在腔内插入 KTP 倍频晶体, 得到单频绿光输出。

## 1 设计原理

在环形激光器中, 可利用光学单向器使激光器单向运转, 消除空间烧孔效应, 得到单频激光输出。本文设计了结构如图 1 所示的非平面环形谐振腔, 将  $\overline{M_1M_2}$  与  $\overline{M_3M_4}$  两条直线在剖视面内的夹角定义为非平面角  $\Omega$  (见图 1(b)), 间距  $\overline{M_1M_2} = 100 \text{ mm}$ ,  $\overline{M_3M_4} = 48 \text{ mm}$ ,  $\overline{AB} = 25 \text{ mm}$ 。在腔内插入布儒斯特窗片作为起偏器, 正向及反向传播的偏振光穿过加有磁场的 Nd:YAG 晶

本研究工作得到国家自然科学基金, 山西省自然科学基金资助。

收稿日期: 1995 年 12 月 12 日; 收到修改稿日期: 1996 年 3 月 11 日

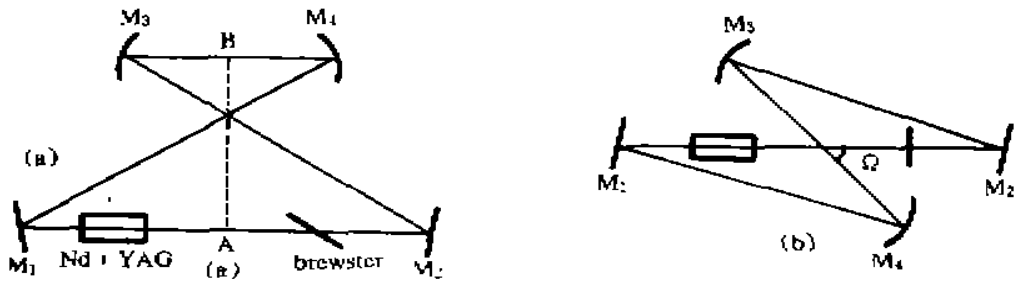


Fig. 1 Configuration of the non-planar ring resonator. (a) plane view, (b) side view

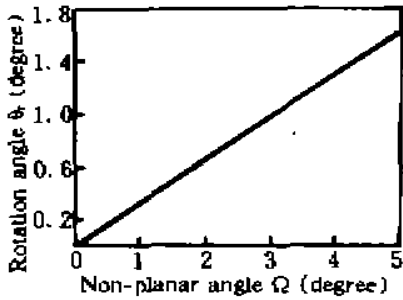


Fig. 2 Dependence of polarization rotation on non-planar angle

体产生彼此同向的偏振旋转，在现有磁场作用下，偏振方向旋转  $0.6^\circ$ 。偏振光在非平面谐振腔内传播一周后，产生彼此反向的偏振旋转，图 2 是用标准的光束追迹方法计算的光束绕谐振腔一周后，偏振方向旋转角  $\theta$  随非平面角  $\Omega$  的变化曲线。当非平面角为  $1.85^\circ$  时，偏振方向旋转角为  $0.6^\circ$ 。可以通过调节非平面角，降低正向传播激光的偏振损耗，增大反向传播激光的偏振损耗，迫使激光器单向运转，得到单频激光输出。

在纵向泵浦系统中，连续环形激光器的阈值泵浦功率由

下式给出<sup>[7]</sup>

$$P_{th} = \eta_c (\pi h \nu_p / 2 \sigma \tau) (T + L_{cav}) (\omega_0^2 + \omega_p^2) [1 - \exp(-\alpha L)]^{-1} \quad (1)$$

式中  $\eta_c$  为泵浦光耦合系数， $h\nu_p$  为泵浦光子能量， $\sigma$  为受激发射截面， $\tau$  为上能级寿命， $\alpha$  为增益介质对泵浦光的吸收系数， $L$  为增益介质的长度， $\omega_0$ 、 $\omega_p$  分别为振荡激光与泵浦激光的腰斑半径，谐振腔的损耗包括透射损耗 ( $T$ ) 与内腔损耗 ( $L_{cav}$ )。激光器的斜效率  $\eta_s$  为：

$$\eta_s = f_{\omega_0} \eta_c (v_0 / v_p) [T / (T + L_{cav})] [1 - \exp(-\alpha L)] \quad (2)$$

式中  $f_{\omega_0}$  为落入振荡激光  $TEM_{00}$  模体积中的泵浦功率占全部泵浦功率的比例， $v_0/v_p$  为斜效率的量子极限。在如图 1 所示的谐振腔中，腔镜  $M_1$  与镜  $M_2$  之间及腔镜  $M_3$  与腔镜  $M_4$  之间分别有一个腰斑  $\omega_{01}$ 、 $\omega_{02}$ ，用传输矩阵法可计算得  $\omega_{01} = 225 \mu\text{m}$ ， $\omega_{02} = 30 \mu\text{m}$ 。将  $L = 5 \text{ mm}$  的 Nd:YAG 晶体置于  $M_1 M_2$  之间的腰斑处，泵浦光经  $M_1$  聚焦至晶体前端面，且泵浦光腰斑为  $\omega_p = 200 \mu\text{m}$ 。由于泵浦光基本落入振荡激光基模模体积之内，可认为  $f_{\omega_0} = 1$ 。采用 Fndly-Clay 法则<sup>[8]</sup>推测出内腔损耗  $L_{cav} = 2\%$ 。利用参数  $\sigma = 3.3 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ <sup>[9]</sup>， $\tau = 255 \text{ us}$ <sup>[9]</sup>， $\alpha = 4.1 \text{ cm}^{-1}$ ， $\eta_c = 0.95$ ，可由 (1) 式、(2) 式理论计算出当  $T = 5\%$  时  $P_{th} = 320 \text{ mW}$ ， $\eta_s = 45\%$ ；当  $T = 1.5\%$  时  $P_{th} = 155 \text{ mW}$ ， $\eta_s = 28\%$ 。进一步将输出耦合镜换成基波光全反镜，并将倍频晶体插入  $M_3$ 、 $M_4$  之间的腰斑处，即可得到单频绿光输出。

## 2 实验装置及实验结果

### 2.1 单频基波运转

实验装置如图 3 所示，用 SDL-2482-P1 型激光二极管作为泵浦源，经光束整形聚焦系统后，泵浦光腰斑尺寸为  $400 \times 300 \mu\text{m}$ 。谐振腔采用非平面扭曲形四镜腔结构，如图 1 所示。 $M_1$  为平面输入耦合镜  $R_{1.064 \mu\text{m}} > 99.5\%$ ， $R_{509 \text{ nm}} < 5\%$ ； $M_2$  为平面输出耦合镜； $M_3$ 、 $M_4$  为曲面全反镜  $R_{1.064 \mu\text{m}} > 99.5\%$ ，曲率半径分别为  $r_3 = 50 \text{ mm}$ ， $r_4 = 40 \text{ mm}$ ；非平面角  $\Omega$  约为  $1.85^\circ$ ，Nd:YAG 晶体尺寸为  $\phi 3 \times 5 \text{ mm}$ ，置于  $M_1$ 、 $M_2$  之间的腰斑处，磁场直接加至 Nd:YAG 晶体上。通过调节非平面角  $\Omega$  使激光器单向运转，并调节布儒斯特窗片及 Nd:YAG 晶体的方位使激光器达最佳状态。LP-2B 型功率计探测  $M_2$  输出的  $1.064 \mu\text{m}$  激光，输出功率曲线如图 4 所

示，当输出透射率分别为 1.6% 及 5% 时，阈值泵浦功率分别为 170 mW 及 380 mW，最大输出功率分别为 340 mW 及 365 mW，斜效率分别为 27.5% 及 36.2%，与理论计算值基本一致。

输出激光的功率波动用 FND-100 型光电探测器探测，由 Tek2430A 型示波器及 HP ColorPro 绘图仪记录，功率波动如图 5 所示，短期功率波动小于 2%。

输出激光的模式及频率漂移，由扫描共焦腔监视并由示波器及绘图仪记录。监视腔是由两个曲率半径为  $r = 102 \text{ mm}$ ，反射率  $R = 99.5\%$  的凹面镜组成的共焦腔，自由光谱范围为 735 MHz。激光器输出激光的模式为单纵模，如图 6 所示。短期(1 min 内)频率漂移小于 45 MHz，如图 7 所示。

### 2.2 单频绿光运转

单频绿光激光器的实验装置类似于图 3。

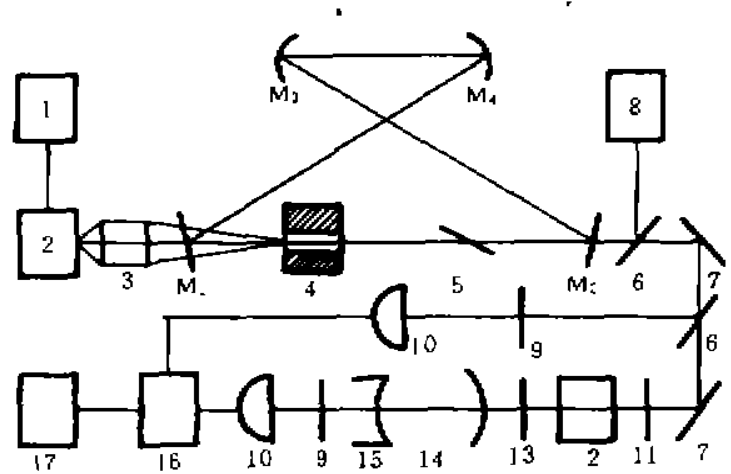


Fig. 3 Schematic diagram of the experimental system. 1; laser diode driver; 2; laser diode; 3; focusing optics;  $M_1$ ; input coupler;  $M_2$ ; output coupler;  $M_3, M_4$ ; high reflectivity mirror; 4; Nd:YAG and magnet; 5; Brewster; 6; beam splitter; 8; power meter; 9; filter; 10; photo-electric detector; 11; half-wave plate; 12; polarizer; 13; quarter-wave plate; 14; F-P cavity; 15; PZT; 16; oscilloscope; 17; plotter

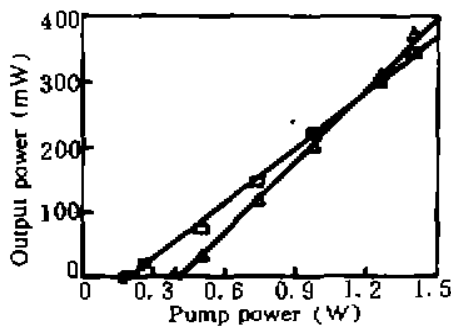


Fig. 4 Output power of fundamental wave output power versus pump power ( $\square$ ;  $T = 1.6\%$ ;  $\triangle$ ;  $T = 5\%$ )

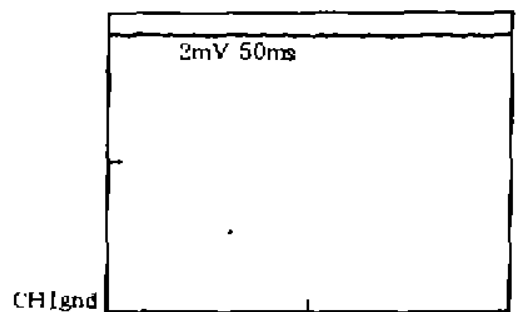


Fig. 5 The intensity fluctuation of fundamental wave. The lowest line is the ground level

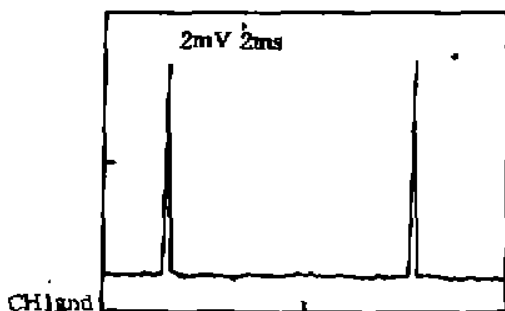


Fig. 6 The transmission of fundamental wave through the scanning F-P cavity with a free spectral range of 735 MHz. 1 ms corresponds to 60 MHz

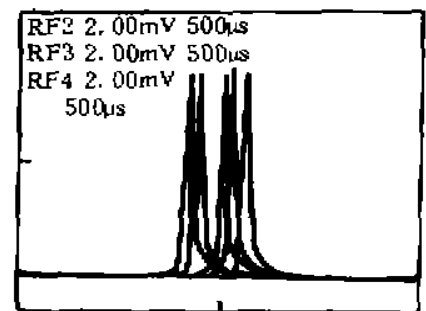


Fig. 7 The frequency shift of fundamental wave (the duration of measurement is 1 minute, 1 ms corresponds to 60 MHz)

区别在于将输出耦合镜  $M_2$  换成平面全反镜  $R_{1.064 \mu\text{m}} > 99.5\%$ ，并将 KTP 倍频晶体置于  $M_3, M_4$

之间的腰斑处, KTP 晶体尺寸为  $3 \times 3.5$  mm。将激光器调至单向运转, 绿光由  $M_4$  输出 ( $M_4$  对绿光的透射率为 90%), 输出功率曲线如图 8 所示, 阈值泵浦功率为 350 mW, 当泵浦功率为 1.4 W 时最大绿光输出功率为 75 mW, 光-光转换效率为 5.4%。激光器的输出激光用扫描共焦腔监视仍为单纵模。绿光功率波动由光电探测器探测, 并由示波器及绘图仪记录, 短期绿光功率波动小于 4%。

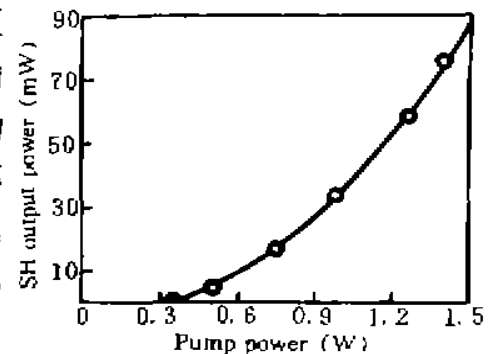


Fig. 8 SH output power versus pump power

**结 论** 本文利用 Nd:YAG 激光介质自身的磁旋光效应, 设计了具有使光束偏振面旋转特性的非平面环形谐振腔, 通过调整非平面角使激光器单向运转, 消除了空间烧空效应, 获得单频基波与二次谐波输出。该器件由激光二极管泵浦, 内腔元件少, 腔形结构简单紧凑, 利于实际应用。如果加上腔模锁定系统则能获得稳频激光输出, 因而有着广阔的应用前景。

### 参 考 文 献

- [1] T. J. Kane, R. L. Byer, Monolithic unidirection single-mode Nd:YAG ring laser. *Opt. Lett.*, 1985, **10**(2): 65~67
- [2] W. R. Trutna, D. K. Donald, M. Nazarathy, Unidirectional diode-laser-pumped Nd:YAG ring laser with a small magnetic field. *Opt. Lett.*, 1987, **12**(4): 248~250
- [3] T. Day, E. K. Gustafson, R. L. Byer, Sub-hertz relative frequency stabilization of two-diode laser-pumped Nd:YAG lasers locked to a Fabry-Perot interferometer. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1992, **QE-28**(4): 1106~1117
- [4] J. Harrison, A. Finch, J. H. Flint *et al.*, Broad-band rapid tuning of a single-frequency diode-pumped Neodymium laser. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1992, **QE-28**(4): 1123~1130
- [5] R. Scheps, J. F. Myers, Scalable single-frequency diode-pumped ring laser. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(9): 1221~
- [6] G. T. Maker, G. P. A. Malcolm, A. I. Ferguson, Single-frequency diode-pumped Nd:YAG ring laser with no intracavity elements. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(21): 1813~1815
- [7] P. F. Moulton, An investigation of the Co:MgF<sub>2</sub> laser system. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1985, **QE-21**(10): 1582~1595
- [8] D. Findly, R. A. Clay, The measurement of internal losses in 4-level lasers. *Phys. Lett.*, 1966, **20**(3): 277~280
- [9] A. A. Kamunskii, *Laser Crystal*. New York, Springer-Verlag, 1990, 240~241

## All-Solid State Out-of-Plane Nd:YAG Ring Laser of Single-Frequency Operation

Zhang Kuanshou      Zhang Yun      Xie Changde      Peng Kunchi

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

(Received 12 December 1995; revised 11 March 1996)

**Abstract** By using the Faraday effect in Nd:YAG and the rotation of polarization in a non-planar ring resonator, single-frequency output from an all-solid-state out-of-plane Nd:YAG ring laser is demonstrated. The maximum single-frequency output of 365 mW at 1064 nm has been achieved with slope efficiency of 36.2%, the intensity fluctuation is less than 2% and the frequency shift is less than 45 MHz in 1 minute. Single-frequency output of 75 mW at 532 nm has been obtained by intracavity frequency doubling. The intensity fluctuation for 532 nm is less than 4%.

**Key words** all-solid-state, out-of-plane, single-frequency laser.