

文章编号: 0258-7025(2003)10-0881-04

# 波长为 1319 nm 的连续输出 Nd:YAG 激光器的研究

王 涛<sup>1,2,3</sup>, 姚建铨<sup>1</sup>, 李喜福<sup>1</sup>, 郁道银<sup>1</sup>, 禹国俊<sup>1</sup>, 王 鹏<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 天津大学精密仪器与光电子工程学院激光与光电子研究所光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072  
<sup>2</sup> 河北工业大学机械学院, 天津 300130; <sup>3</sup> 华中科技大学激光技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074

**摘要** 介绍了一种波长为 1319 nm 的连续 Nd:YAG 激光器, 分析了 1319 nm 激光的辐射跃迁能级, 论述了抑制 1064 nm 激光的生成从而提高 1319 nm 激光输出等关键技术, 研究了光学镜片的镀膜参数与腔型结构, 实现了 1319 nm 最大功率为 43 W 的激光连续输出。

**关键词** 激光技术; 1319 nm 激光器; Nd:YAG 晶体; 能级跃迁

**中图分类号** TN 248.1 **文献标识码** A

## Study on CW Nd:YAG Laser at 1319 nm

WANG Tao<sup>1,2,3</sup>, YAO Jian-quan<sup>1</sup>, LI Xi-fu<sup>1</sup>,  
YU Dao-yin<sup>1</sup>, YU Guo-jun<sup>1</sup>, WANG Peng<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Optoelectronics Information Science and Technology Lab, Institute of Lasers and Optoelectronics,  
College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

<sup>2</sup> College of Mechanism Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China

<sup>3</sup> State Key Laboratory of Laser Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

**Abstract** This paper reported a CW Nd:YAG laser with the wavelength of 1319 nm. The radiation energy level of 1319 nm wave was analyzed. Restraint of 1064 nm wave resonance and improvement of 1319 nm output was discussed. Coating of mirror and cavity structure was studied and a maximum cw output of 43 W at 1319 nm was realized in the experiment.

**Key words** laser technique; 1319 nm laser; Nd:YAG crystal; radiation energy level

## 1 引 言

波长为 1319 nm 的激光可用于倍频输出 660 nm 红光, 这是获得高功率红光输出的有效方法之一, 它还可用于光学参量放大器的抽运源<sup>[1]</sup>, 在光纤拉曼放大中也有重要应用, 另外它在医疗上也有应用; 然而目前关于 1319 nm 激光器的研究与实验相关报道甚少。本文对 1319 nm Nd:YAG 激光的辐射跃迁能级进行了分析, 建立了相应的辐射速率方

程, 提出了抑制 1064 nm 激光从而提高 1319 nm 激光输出等关键技术, 对光学镜片的镀膜参数与腔型结构进行了研究, 并使 1319 nm 激光的连续输出最大功率达到 43 W。

## 2 1319 nm 波长激光的能级与振荡速率方程

选用  $\phi 6 \text{ mm} \times 110 \text{ mm}$  的 Nd:YAG 晶体, 它具

收稿日期: 2003-04-14; 收到修改稿日期: 2003-07-01

基金项目: 华中科技大学激光技术国家重点实验室(2001)0104 号开放基金资助、国家自然科学基金(60278032, 60278001)、教育部南开大学和天津大学科技合作基金资助项目。

作者简介: 王涛(1963—), 男, 天津大学精仪学院激光与光电子研究所博士后, 副教授, 主要从事高功率激光器及光纤通讯技术研究。E-mail: wta@eyou.com

有较高的热导率，易于散热，热畸变小，破坏阈值较高等特点<sup>[2]</sup>，另外，其工艺技术成熟、商品化程度高，可以用于连续运转等工作方式。Nd:YAG 激光晶体是以三价钕离子作为激活粒子的四能级系统，具有 1064 nm, 950 nm 及 1319 nm 三种波长辐射跃迁能级，可利用其 1319 nm 波长辐射跃迁输出相应波长的激光。

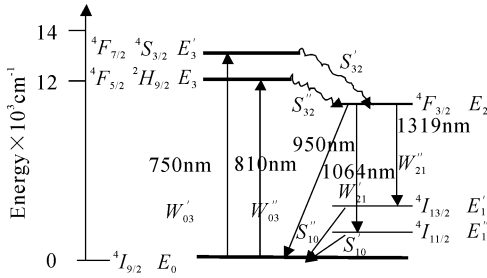


图 1 Nd:YAG 晶体中 Nd<sup>3+</sup> 的能级图  
Fig. 1 Transition levels in Nd:YAG crystal

图1为 Nd:YAG 晶体中 Nd<sup>3+</sup> 的能级图<sup>[2]</sup>，基态 <sup>4</sup>I<sub>9/2</sub> 的钕离子吸收抽运光子能量后跃迁到抽运高能级 <sup>4</sup>F<sub>7/2</sub>，<sup>4</sup>S<sub>3/2</sub>，<sup>4</sup>F<sub>5/2</sub>，<sup>2</sup>H<sub>9/2</sub>，而后几乎全部经无辐射跃迁迅速降落到寿命为 0.23 ms 的亚稳态能级 <sup>4</sup>F<sub>3/2</sub>，处于该能级的 Nd<sup>3+</sup> 离子可以向 3 个终端能级辐射跃迁，几率最大的是辐射 1064 nm 波长的 <sup>4</sup>F<sub>3/2</sub> 到 <sup>4</sup>I<sub>11/2</sub> 的跃迁，为四能级系统；其次，辐射 950 nm 波长的 <sup>4</sup>F<sub>3/2</sub> 到 <sup>4</sup>I<sub>9/2</sub> 的跃迁，三能级系统；几率最小的是辐射 1319 nm 波长的 <sup>4</sup>F<sub>3/2</sub> 到 <sup>4</sup>I<sub>13/2</sub> 的跃迁，四能级系统。对于多模振荡，不妨假设各个模式损耗相同，假设用一矩形谱线<sup>[2]</sup>  $\tilde{g}'(\nu, \nu_0)$  代替线性函数  $\tilde{g}(\nu, \nu_0)$ ，可建立 1319 nm 波长的简化四能级多模振荡的速率方程

$$\begin{aligned} \frac{dN}{dt} &= \left( n_2 - \frac{f_2}{f_1} n_1' - \frac{f_2}{f_1} n_1'' \right) \sigma_{21} \nu N - \frac{N}{\tau_R} \\ \frac{dn_3'}{dt} + \frac{dn_3''}{dt} &= n_0 W_{03}' + n_0 W_{03}'' - \frac{n_3' S_{32}}{\eta_1} - \frac{n_3'' S_{32}}{\eta_1} \\ \frac{dn_2}{dt} &= n_3' S_{32}' + n_3'' S_{32}'' - \left( n_2 - \frac{f_2}{f_1} n_1' - \frac{f_2}{f_1} n_1'' \right) \sigma_{21} \nu N - \frac{n_2 A_{21}'}{\eta_2'} - \frac{n_2 A_{21}''}{\eta_2''} \\ \frac{dn_0}{dt} &= n_1' S_{10}' + n_1'' S_{10}'' - n_0 W_{03}' - n_0 W_{03}'' \\ N &= n_0 + n_1' + n_1'' + n_2 + n_3' + n_3'' \\ W_{21}' &= \frac{A_{21}'}{n_\nu \Delta\nu} N_l \\ W_{21}'' &= \frac{A_{21}''}{n_\nu \Delta\nu} N_l \end{aligned} \tag{1}$$

式中， $n_0, n_1', n_1'', n_2, n_3', n_3''$  为处于各个对应能级上的光子数密度， $N$  为各模式光子数密度的总和， $f_1', f_1'', f_2$  分别为能级  $E_1', E_1'', E_2$  的统计权重， $\sigma_{21}$  为中心频率处的发射截面， $\nu$  为介质中的光速， $\tau_R$  为第  $l$  个模式的光子寿命。将图 1 各个能级对应简记为  $E_0, E_2, E_3', E_3'', E_1', E_1''$ 。 $W_{03}', W_{03}''$  为受激吸收跃迁几率， $S_{32}', S_{32}'', S_{21}', S_{21}'', S_{10}', S_{10}''$  为无辐射跃迁（热弛豫）几率， $W_{21}', W_{21}''$  为受激辐射跃迁几率， $A_{21}', A_{21}''$  为自发辐射跃迁几率， $N_l$  为第  $l$  模内的光子数密度， $n_\nu$  为频率为  $\nu$  模的总光子数， $\Delta\nu$  为谱线宽， $\eta_1', \eta_1''$  为无辐射跃迁的量子效率， $\eta_2', \eta_2''$  为能级跃迁的荧光效率。 $E_3', E_3''$  上的粒子，其中一部分  $n_w$  以无辐射跃迁的形式转移到  $E_2$  上，处于  $E_2$  上粒子中的一部分  $n_F$  则发生辐射跃迁分别降落到激光下能级  $E_1'$  与  $E_1''$  上，前者对应  $n_{F1}$  辐射 1064 nm 波长光子，后者对应  $n_{F2}$  辐射 1319 nm 波长光子，有式  $n_F = n_{F1} + n_{F2}$  成立，对于系统来说  $n_F$  是一定的，因 <sup>4</sup>I<sub>11/2</sub> 位于基态之上，集居数很少，只需要很低的抽运能量就能实现激光振荡，由于  $n_{F1}$  很大， $n_{F2}$  较小，使 1319 nm 波长辐射难于增大，为此，减弱  $W_{21}'$  激励，抑制 1064 nm 波长光子，是保障 1319 nm 波长光产生的有效方式。

### 3 腔型的研究

首先优化谐振腔，在主要器件不变的情况下，合理地缩短腔长，可以提高激光输出功率。图 2 为激光腔示意图，腔长的关系式<sup>[3]</sup>如下

$$d_2 = \frac{f_1 \left( \frac{\pi \omega_{m,01}^2}{\lambda k^2} \right)^2 + f_1 d_1^2 - f_1^2 d_1}{f_1^2 - 2d_1 f_1 + d_1^2 + \left( \frac{\pi \omega_{m,01}^2}{\lambda k^2} \right)^2} \tag{2}$$

$$\omega_{m,02} = \frac{\omega_{m,01}}{\sqrt{\left( 1 - \frac{d_1}{f_1} \right)^2 + \left( \frac{\pi \omega_{m,01}^2}{\lambda f_1 k^2} \right)^2}}$$

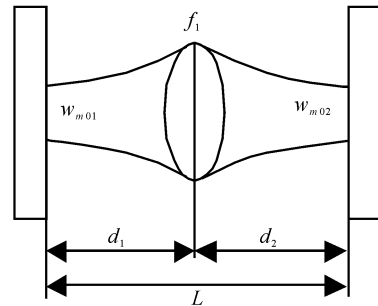


图 2 激光腔示意图

Fig. 2 Schematic of laser cavity

其中,  $w_{m,01}, w_{m,02}$  分别为混合模在两个镜面上的光斑半径,  $f_1$  为热焦距,  $K$  为多模系数,  $L$  为腔长(应为实际腔长减去 Nd:YAG 棒长)。本系统中设定为对称腔, 故  $d_1 = d_2 = L/2$ , 又由于谐振腔内光束的自洽, 有  $w_{m,01} = w_{m,02} = w_{m,0}$ , 可进一步由式(2) 得出

$$\left(1 - \frac{d_1}{f_1}\right)^2 + \left(\frac{\pi w_{m,0}^2}{\lambda f_1 k^2}\right)^2 = 1$$

或  $\frac{w_{m,0}}{k} = \sqrt{\frac{\lambda^2}{\pi^2} L \left(f_1 - \frac{L}{4}\right)}$  (3)

$$\theta = \frac{w_{m,0}}{f_1 \sqrt{L \left(1 - \frac{d_1^2}{f_1^2}\right)^2}} = \frac{w_{m,0}}{\sqrt{(2f_1 - d_1)d_1}}$$

为获得较大的模体积, 在抽运条件一定时,  $f_1$  为一常数,  $w_{m,0}/k$  应对应一个极大值, 从而接近基模运转状态, 而它对应最佳腔长<sup>[3]</sup>, 由于系统参数选用的差异, 以实验系统参数理论计算所得最佳腔长范围为 380~420 mm。基于获得较大的模体积、较好的光束质量等综合因素, 系统选用平-平腔结构。

### 4 实验研究

#### 4.1 光路

光路如图 3 所示, 平-平腔结构, 其中, 1 为全反镜, 2 为聚光腔, 3 为 KG-6000 型氩灯, 外形尺寸为  $\phi 9 \text{ mm} \times 110 \text{ mm}$ , 4 为 Nd:YAG 晶体棒, 其尺寸为  $\phi 6 \text{ mm} \times 110 \text{ mm}$ , 5 为输出镜, 6 为实验用滤光片。

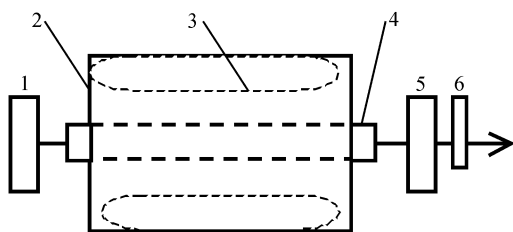


图 3 1319 nm Nd:YAG 激光器光路图  
Fig. 3 Schematic of 1319 nm Nd:YAG laser

#### 4.2 Nd:YAG 晶体及镜片的镀膜

为抑制 1064 nm 波长光的起振, 并减小 1319 nm 波长光的腔内损耗, 在 Nd:YAG 晶体的两端面须镀 1319 nm 和 1064 nm 的增透膜; 激光谐振腔内, 全反镜与输出镜均镀 1064 nm 高透膜, 以使 1064 nm 光子漏出谐振腔而不能形成振荡, 以保证 1319 nm 波长光起振, 全反镜镀 1319 nm 高反膜, 输出镜镀 1319 nm 半反膜。

#### 4.3 聚光腔、抽运灯及激光电源

聚光腔采用镀金、双灯抽运结构, 激光电源为自行研制的“580C 型双灯抽运连续激光电源”, 额定电流 26A, 额定电压 240V, 最高电流 30A。将原纵向连接的抽运灯电极改进为横向连接方式, 有效地缩短了聚光腔的空间长度, 有益于提高激光输出功率。

系统中聚光腔和 YAG 晶体的冷却采用自行研制的激光器专用制冷机<sup>[3]</sup>, 制冷功率 5 kW, 冷却效果很好, 可长时间稳定工作。

#### 4.4 实验结果

波长 1319 nm 激光器的实验光路中, 电压为 205 V, 抽运电流达到 12.5 A 时, 开始有激光输出, 结果如图 4。

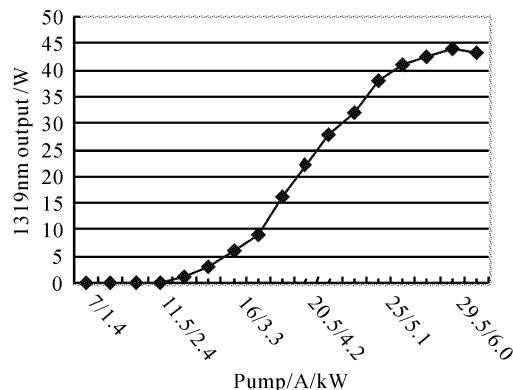


图 4 1319 nm 波长激光输出曲线  
Fig. 4 Laser input-output power line

由图 4 曲线知 1319 nm 光子的辐射过程比同等情况下 1064 nm 光子的辐射过程弱<sup>[5]</sup>, 不易起振, 实验系统中输出镜对 1319 nm 透射率取为 4% 时效果良好; 实验用非 1064 nm 增透膜的输出镜时, 1319 nm 波长光的输出甚小, 与前述理论吻合, 输出镜透射率  $T$  为 8.7% 时, 输出很小, 原因是  $T$  过大致使 1319 nm 波长光子“漏出”过多而难以起振, 对于过小的  $T$  如小于 1.6% 则输出光过少而功率过低, 故镀膜参数及质量对于 1319 nm 波长光的输出影响较大。在电流为 28 A 时, 1319 nm 波长输出功率为 42 W, 电压 205 V, 抽运功率 5.7 kW, 效率很低, 仅为 7.3%。当电流超过 28.5 A 时, 输出功率开始下降, 主要是由于此时激光晶体过热致使热焦距等发生变化所致。

腔长对输出功率的影响如图 5 所示, 由图可见, 腔长加长, 输出功率降低, 对于一般混模高功率输出时,  $f_1$  通常要大于  $d_1$ , 实验表明, 在结构允许的情

况下,缩短腔长至最佳范围可以提高激光输出功率,与前面理论计算相符合。

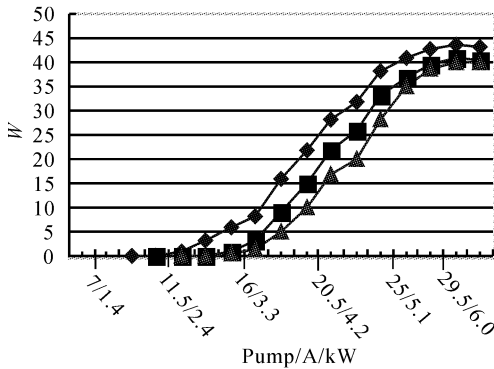


图 5 腔长对输出功率的影响

Fig. 5 Output power versus pumping current when cavity length is different

cavity length: —◆—390 mm; —■—420 mm; —▲—450 mm

参 考 文 献

- 1 Yao Jianquan. Nonlinear Optical Frequency Transformation and Laser Tuning Technology [M]. Beijing: Beijing Scientific Press, 1995. 109~139 (in Chinese)
- 2 Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Chen Chourong. Laser Elements [M]. Beijing: National Defence Industry Book Concern, 2000. 123~276 (in Chinese)
- 3 Wang Tao, Yao Jianquan, Li Xifu. A CW Nd:YAG intracavity frequency-doubled red laser [J]. *Laser Journal* (激光杂志), 2002, 23(3):10~12 (in Chinese)
- 4 Yao Jianquan, Yu Yizhong, Wang Peng et al.. Nearly-noncritical phase matching in MgO:LiNbO<sub>3</sub> optical parametric oscillators [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2001, 18(9):1214~1217
- 5 Wang Tao, Yao Jianquan, Li Xifu. The study on quasi-CW Nd:YAG intracavity frequency-doubled green laser [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser* (光电子•激光), 2002, 13(6):575~577 (in Chinese)

掺 Yb 双包层光纤激光器获得 50 W 激光输出\*

双包层光纤激光器同常规激光系统相比,其在散热、光束质量、效率、体积等方面具有显著优势,是高功率激光器向小型化、全固化和集成化发展的一个重要方向,采用掺 Yb 的双包层光纤实现高功率 1 μm 左右的单模激光输出是目前人们研究的重点。最近,我们采用准直输出的大功率半导体激光器为抽运源,通过特殊设计的抽运耦合系统来抽运 D 形内包层的双包层光纤,获得了 50.3 W 的激光功率输出。

所用抽运源为准直输出的大功率 LD 模块,其输出约为 72 mm×24 mm 的长方形准直光束,中心波长约在 975 nm。双包层光纤为 D 形内包层(350/400 μm)的掺 Yb<sup>3+</sup> 石英光纤,内包层数值孔径为 0.37,掺 Yb<sup>3+</sup> 纤芯直径约 12 μm,数值孔径约为 0.15,掺杂浓度为 65×10<sup>-4</sup> mol,光纤长度约为 39 m。通过特殊设计的非球面耦合透镜系统,将抽运源模块的输出直接抽运双包层光纤。抽运光聚焦光斑在数值孔径和光斑大小上均略小于内包层的相应参数,从而高能抽运光可以直接耦合入双包层光纤。实验采用典型的 F-P 腔结构,光纤的抽运端面有一双色片(975 nm, T~90%,1060~1150 nm, R>

99.8%)作为前腔镜,另一端直接以石英-空气界面为输出镜,通过一短焦距透镜将输出激光准直。

实验中,当照射到双色片上的抽运功率为 2 W 时,光纤有激光输出,增大抽运功率,输出功率随之增大,当入射抽运功率为 114 W 时,得到了 50.3 W 的激光输出,光-光转换效率约为 44.8%。通过光纤截断法,测量了抽运光的入纤功率,得到相对于入纤功率斜率效率为 69.1%的实验结果。

实验过程中,光纤是直接盘在直径 32 cm 的塑料圆盘上,置于室温下,仅仅依靠光纤本身自然散热,所测得的激光输出功率和抽运功率成很好的线性关系,光纤本身也没有观测到明显的热问题,这说明通过提高抽运功率或改进耦合系统,采用此种光纤还可以进一步提高激光输出功率。

中国科学院上海光学精密机械研究所,  
上海 201800  
楼祺洪,周 军,朱健强,吴中林,  
董景星,孔令峰,魏运荣,叶震寰,王之江  
收稿日期:2003-09-08

\* 国家自然科学基金(编号:60244005)、中国科学院知识创新工程和上海市科委光科技专项资助项目。