

文章编号: 0258-7025(2003)02-0097-04

# 准连续激光二极管抽运的 Yb:YAG 微晶片激光器

吴海生, 闫平, 巩马理, 柳强, 李晨, 谢韬

(清华大学精密仪器系数字光电与激光技术实验室, 北京 100084)

**摘要** 采用峰值功率 1 W 的国产 InGaAs 激光二极管作抽运源, 在室温下实现了光束质量因子  $M^2 < 1.4$  的基横模长脉冲激光振荡。当 LD 输入电流为 2.15 A 时, 使用掺杂浓度为 10 at.-% 的 Yb:YAG, 获得了平均功率 1.64 mW, 单脉冲能量为 16.4  $\mu$ J 的 1.049  $\mu$ m 激光输出。同时对准三能级结构激光弛豫振荡过程和准连续(QCW)输出脉冲宽度进行了理论分析, 得到了跟实验相符的结果。

**关键词** 激光技术; Yb:YAG 晶体; 激光二极管抽运; 光束质量; 弛豫振荡

中图分类号 TN 248.1 文献标识码 A

## QCW-LD-pumped Yb:YAG Microchip Lasers

WU Hai-sheng, YAN Ping, GONG Ma-li, LIU Qiang, LI Chen, XIE Tao

(Digital Photonics Lab, Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract** The properties of a QCW-LD-pumped Yb:YAG microchip laser was first presented in detail. At room temperature, 1.64 mW average output power and 16.4  $\mu$ J pulse energy at 1.049  $\mu$ m were obtained with a 10 at.-% doped Yb:YAG microchip crystal when diode current was at 2.15 A. The beam quality factor  $M^2$  values were measured to be 1.37 and 1.15 in the vertical and horizontal directions respectively. Theoretical results of laser output pulse width and relaxation oscillation were consistent with experimental values by analysis of quasi-three-level rate equations of Yb:YAG microchip laser.

**Key words** laser technique; Yb:YAG crystal; LD-pumped; beam quality; relaxation oscillation

## 1 引言

Yb:YAG 晶体由于具有吸收带宽(约 18 nm), 上能级寿命长(1 ms), 量子效率高, 热负荷小, 不存在激发态吸收和上转换, 高掺杂而不发生浓度猝灭等特点, 特别适用于高平均功率激光器。由于所需 InGaAs 激光二极管(LD)抽运源的激光性能日趋成熟和可靠, 为 Yb:YAG 激光器的发展提供了前提条件, 因此 LD 抽运的 Yb:YAG 已成为目前固体激光领域内一个重要的研究方向。

目前, 国外采用 QCW 激光二极管抽运的 Yb:YAG 激光器主要集中在美国的 Huges 实验室, 其侧面抽运的 Yb:YAG 激光器, 最大输出峰值功率为 600W, 脉冲能量大于 1 J<sup>[1,2]</sup>; 日本的 Laser Divison, FANUC LTD 采用 QCW 激光二极管(平均功率为

76.4 W)抽运的板条激光器, 获得了平均功率为 1.6 W, 脉冲宽度 500  $\mu$ s, 重复频率 200 Hz, 脉冲能量 8 mJ 的激光输出<sup>[3]</sup>。

在国内, 还未见详细报道 QCW-LD 抽运的 Yb:YAG 激光器激光特性方面的文章。本课题组在获得高光束质量 CW 运转的 LD 抽运的 Yb:YAG 激光器的基础上<sup>[4]</sup>, 对 QCW 运转的 Yb:YAG 激光性能进行了研究。本文详细报道了 QCW-LD 抽运的 Yb:YAG 激光性能, 并对准三能级激光器的脉冲建立时间和振荡过程进行了理论分析。

## 2 准三能级速率方程及弛豫振荡

### 2.1 准三能级速率方程

Yb:YAG 为准三能级结构的晶体。根据原子自

收稿日期: 2001-09-29; 收到修改稿日期: 2002-01-14

作者简介: 吴海生(1974—), 男, 现在清华大学精密仪器与机械学系攻读博士学位, 主要从事光学设计及激光器件方面的研究。E-mail: wuhs@post.pim.tsinghua.edu.cn

发辐射、受激辐射和受激吸收跃迁几率的关系,可得准三能级速率方程<sup>[5]</sup>为

$$\dot{N}_{\text{eff}} = g_g f_g W_p (g_u f_u N_l - N_{\text{eff}}) - \frac{2g_u(f_u + f_l)qN_{\text{eff}}\sigma_g - g_u f_l N_l + N_{\text{eff}}}{t_n A_g} \quad (1)$$

$$\dot{q} = \dot{q}_s - \dot{q}_l = \frac{2N_{\text{eff}}\sigma_g q}{t_n A_g} - \frac{q\gamma_n}{t_n} \quad (2)$$

“ $\dot{\cdot}$ ”为对时间求导运算。 $N_{\text{eff}}$ 为有效反转粒子数, $q$ 为腔内光子数密度, $q_s, q_l$ 分别为受激态光子密度和损耗消耗的光子数密度, $N_l$ 为掺杂总粒子数, $g_u, g_g$ 为激光上能级、激光基态能级的简并度, $f_u, f_l, f_g$ 分别为激光上能级占上能级( $^2F_{5/2}$ )粒子总数、激光下能级和激光基态能级占下能级( $^2F_{7/2}$ )粒子总数的比例, $W_p$ 为抽运速率, $A_g$ 为激光模式横截面积, $t_n$ 为光子在腔内往返一周的时间,腔内损耗系数 $\gamma_n = -\ln(1 - \Gamma_n)$ , $\Gamma_n$ 为光子在腔内往返一周的损耗,发射截面 $\sigma_g$ 跟有效发射截面 $\sigma_{\text{eff}}$ 的关系为 $\sigma_{\text{eff}} = g_u(f_u + f_l)\sigma_g$ , $\tau$ 为激光上能级寿命。

依据速率方程,可以描述 QCW 激光振荡过程,计算得到输出脉冲宽度。

## 2.2 弛豫振荡

QCW 激光器作为长脉冲激光器,其输出激光在脉冲末期跟连续激光类似,但在脉冲建立初期产生弛豫振荡。对于单模激光而言,弛豫振荡为规则的阻尼振荡。根据速率方程(1),(2)求得准三能级弛豫振荡时间以及阻尼振荡周期 $\omega$

$$\tau_0 = \frac{2\tau F_{N,\text{th}}(g_u f_u - F_{N,\text{th}})}{g_u f_u R_w (g_u f_l + F_{N,\text{th}}) - g_u f_l (g_u f_u - F_{N,\text{th}})} \quad (3)$$

$$\omega = \left[ \frac{(R_w - 1)(g_u f_l + F_{N,\text{th}})\gamma_n}{\tau t_n F_{N,\text{th}}} - \frac{1}{\tau_0^2} \right]^{1/2} \quad (4)$$

公式中 $F_{N,\text{th}} = N_{\text{th}}/N_l, R_w = W_p/W_{p,\text{th}}, N_{\text{th}}$ 为阈值反转粒子数, $W_{p,\text{th}}$ 为阈值抽运速率。当 $\tau_0 > 1/\omega$ 时,产生弛豫振荡。

## 3 实验装置

QCW-LD 抽运的 Yb:YAG 微晶片激光器实验装置如图1所示,抽运源为峰值功率 1 W 的 InGaAs 激光二极管,其电源采用具有高精度温控电路的 SDL-820 电源。抽运光经过两个焦距为 9.8 mm 的透镜耦合,约 76%抽运光聚焦于 Yb:YAG 晶体上。激光腔采用平凹腔,腔长为 25 mm,晶体前表面作为平面反射镜,输出耦合镜曲率半径为 49.6 mm,透过率为 2.3%。晶体前表面对 940 nm 抽运光镀增透膜,透过率为 92.04%,对 1030 nm 镀高反膜,反射率为 99.83%,后表面对 940 nm 抽运光镀高反膜,反射率为 99.17%,对 1030 nm 镀增透膜,透过率为 94.53%。Yb:YAG 晶体掺杂浓度为 10 at.-%,尺寸为 $\phi 5 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 。采用导热性很好的黄铜作为晶体装夹元件,并用半导体制冷器制冷,以控制晶体的温度。实验中采用了 EPM2000 型功率计,PC 激光光束分析仪, $M^2$ -200 光束传输分析仪,安捷伦高速示波器(1.8 GHz, 8GSa/s)和 Model 1554 型可见-红外光电接受器(12 GHz)分别对激光输出功率、激光强度分布、激光光束质量以及激光输出波形进行了测量。

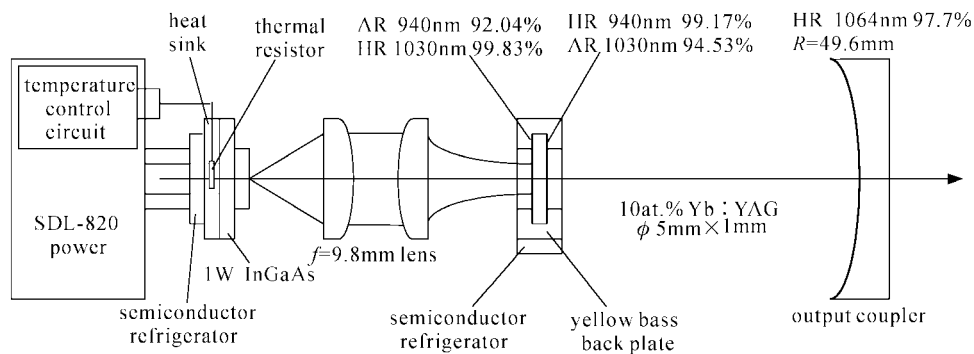


图1 QCW-LD抽运的 Yb:YAG 微晶片激光器结构示意图

Fig. 1 Schematic of QCW-LD pumped Yb:YAG microchip laser

## 4 实验结果与讨论

### 4.1 输出功率

要使 LD 发射谱(中心波长 943.8 nm)与 Yb:

YAG 晶体 941 nm 处的强吸收峰相匹配,必须控制 LD 的工作温度,经测定 LD 需工作在 20℃。此时 LD 输出波长为 940.93 nm, Yb:YAG 激光器可获得

最大输出功率。

室温下(25℃),采用国产峰值功率为 1 W 的 QCW 激光二极管,当驱动电流重复频率为 100 Hz,脉冲宽度为 1 ms,电流输入为 2.15 A 时(Yb:YAG 晶体吸收的抽运光功率约 76 mW),获得了脉冲宽度为 456  $\mu$ s,平均功率为 1.64 mW,单脉冲能量为 16.4  $\mu$ J,1.049  $\mu$ m 基横模激光输出,斜率效率约为 7.18%,激光功率稳定性达 3%,QCW-Yb:YAG 激光器输入输出曲线见图 2 所示。

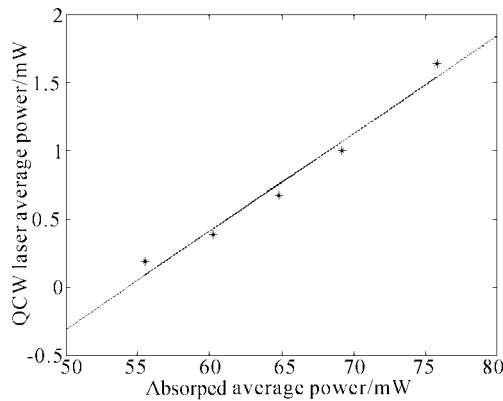


图 2 QCW-LD 抽运的 Yb:YAG 激光器平均输出功率与平均输入功率的关系曲线

Fig. 2 Average output power vs average input power for QCW-LD pumped Yb:YAG laser

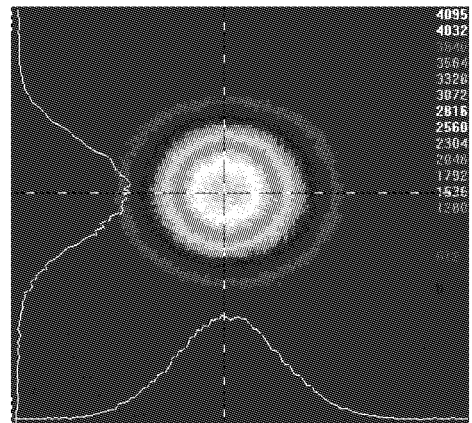
对于准三能级结构激光晶体,晶体制冷可减小激光下能级粒子数,降低阈值,提高激光输出功率。但由于实验环境湿度较大,当环境温度和晶体温度相差较大时,导致晶体表面积水,而晶体所镀膜系又较容易潮解,致使晶体表面膜层出现很多小瑕疵。为防止膜系进一步潮解,没能对晶体实施有效的温度控制,影响了激光器的斜率效率。

#### 4.2 光束质量

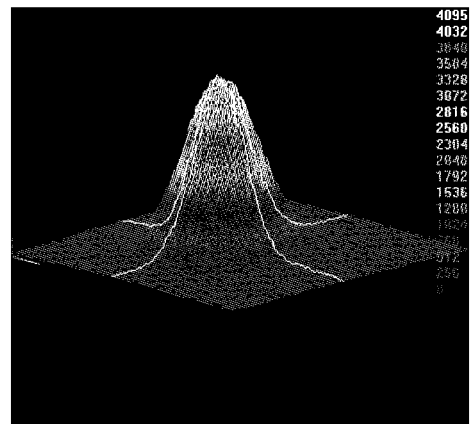
通过合理的激光器谐振腔设计及抽运耦合设计,获得了基横模激光输出。图 3 分别给出了输出激光光束的二维和三维光强分布图,可看出激光光束对称性很好,为基横模输出。 $M^2$  在 X 方向(垂直)和 Y 方向(水平)的值分别为  $M_x^2 = 1.37$ ,  $M_y^2 = 1.15$ ,进一步证实了输出激光具有极高光束质量;输出激光 X 方向的束腰为 0.2066 mm, Y 方向束腰为 0.1914 mm; X 方向发散角为 8.712 mrad, Y 方向发散角为 7.816 mrad。

#### 4.3 QCW 振荡

为研究 QCW 运转的激光振荡过程,对 LD 输入电流波形,LD 激光输出波形,以及 Yb:YAG 脉



(a)



(b)

图 3 QCW 脉冲激光强度分布图

(a) 二维; (b) 三维

Fig. 3 QCW pulse laser intensity distribution with 2D (a) and 3D (b)

冲激光输出波形进行了详细的测量,如图 4 所示。图 4(a)为 LD 脉冲波形,图中 LD 激光输出跟驱动电流保持同步。图 4(b)给出了当 LD 输入电流为 2.05 A 时 QCW Yb:YAG 激光脉冲输出波形。可看出激光脉冲在经过一段时间的延迟后开始建立,初期表现弛豫振荡,后期类似连续输出。

当 LD 驱动电流变化时(保持重复频率 100 Hz 和抽运脉宽 1 ms 不变),QCW Yb:YAG 激光脉冲建立时间和激光脉宽随之变化,如图 5 所示。随着驱动电流的增大,输出激光脉冲宽度越来越大,说明激光建立时间越来越短。抽运速率的提高,单位时间跃迁到激光上能级的粒子数增加,使激光脉冲建立时间缩短,激光脉宽增加。当 LD 抽运电流为 2.15 A 时,相当于抽运功率密度达 1.68 kW/cm<sup>2</sup>,约为阈值的 1.45 倍,脉冲建立时间约 540  $\mu$ s。

根据准三能级速率方程(1),(2),以掺杂浓度 10 at.-% Yb:YAG 微晶片为例,取  $g_u = g_g = 1$ ,  $f_u$

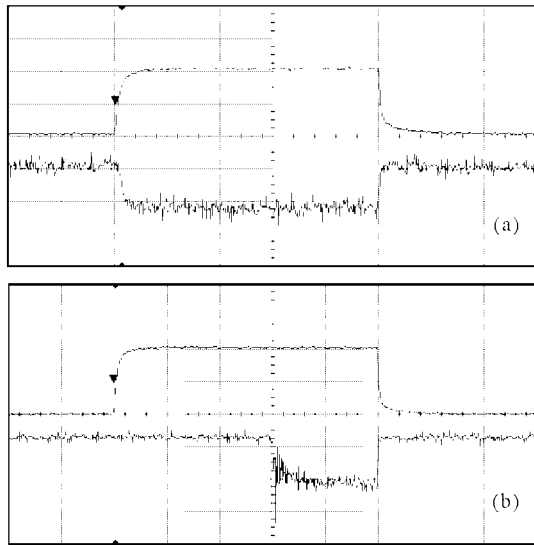


图 4

(a) LD 脉冲建立曲线。上部分曲线为 LD 的输入电流脉冲(1 ms 脉宽, 2.00 A 驱动电流), 下部分曲线为 LD 激光输出脉冲; (b) Yb:YAG 激光脉冲建立曲线。上部分曲线为 LD 的输入电流脉冲(1 ms 脉宽, 2.05 A 驱动电流), 下部分曲线为 Yb:YAG 激光输出脉冲(图中横向时间间隔为 200  $\mu\text{s}$ /格)

Fig. 4

(a) LD pulse curve. Upper trace is 2.00 A pump diode current pulse, lower trace is diode lasing output pulse; (b) Yb:YAG laser pulse curve. Upper trace is 2.05 A pump diode current pulse, lower trace is Yb:YAG lasing output pulse (time scale is 200  $\mu\text{s}/\text{div}$ )

$= 0.772, f_l = 0.020, f_g = 0.876$ , 激光模式横截面半径为 0.120 mm,  $\Gamma_n = 0.2$ , 对应  $1.049\mu\text{m}$  的发射截面  $\sigma_g = 0.5 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ ,  $\tau = 0.95 \text{ ms}$ , 在理论上得到激光输出脉冲宽度随抽运驱动电流变化曲线如图 5 中“+”所示。和实际测量曲线(用“\*”表示)相比, 实际测量值跟理论计算值很接近。

和 Nd:YAG 激光晶体相比, 虽然 Yb:YAG 晶体受激发射截面小, 但具有较长的荧光寿命, 在一定程度上弥补了受激截面小的不足。在长脉冲激光器振荡方面, Yb:YAG 激光器特性跟 Nd:YAG 激光

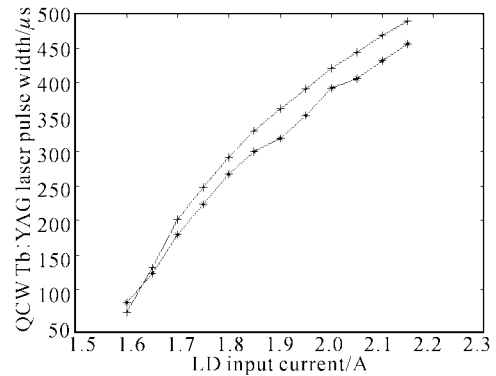


图 5 QCW Yb:YAG 激光脉冲宽度随 LD 抽运电流变化曲线(抽运脉宽 1 ms)

Fig. 5 QCW Yb:YAG lasing pulse width vs LD input current at 1 ms pump width

— \* —: measured value; — + —: theoretical value

器类似。但由于 Yb:YAG 晶体属于准三能级结构, 要求比较高的抽运速率才能达到较高的效率。Yb:YAG 激光晶体准连续振荡过程的研究结果, 可作为设计高功率 QCW 或调 Q 脉冲 Yb:YAG 激光器时的参考。

### 参 考 文 献

- 1 Hans W. Bruesselbac, David S. Sumida, Robin A. Reeder *et al.*. Low-heat high-power scaling using InGaAs-diode-pumped Yb:YAG lasers [J]. *IEEE J. Sel. Top. in Quantum Electron.*, 1997, **3**(1):105~116
- 2 Hans W. Bruesselbac, David S. Sumida, Robin A. Reeder *et al.*. Scaling Yb:YAG lasers to kilowatt powers [C]. *Conference Proceedings-Lasers and Electro-Optics Society Annual Meeting*, 1996, **2**:151~152
- 3 Masao Sato, Nobuaki Iehisa, Norio Karube. LD pumped slab Yb:YAG laser [C]. *SPIE*, 2000, **3889**:208~215
- 4 Wu Haisheng, Yan Ping, Gong Mali *et al.*.  $M^2 \leq 1.14$  diode-pumped Yb:YAG microchip laser [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 2002, **A29**(11):961~964 (in Chinese)
- 5 Mool C. Gupta. *Handbook of Photonics* [M]. USA: CRC Press LLC, 1997. 326~374