

半导体激光列阵泵浦连续和准连续 Nd:YAG 激光器稳定输出

周复正 沈丽青 郑桂珍 范滇元

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

提 要

用连续输出 100 mW 和脉冲输出 200 mW 的国产双异质结激光二极管(DH-LD)泵浦 Nd:YAG 激光器, 得到稳定的半导体激光泵浦的固体激光器连续输出 12 mW 和 10~50 kHz 重复频率的准连续输出, 每个脉冲激光峰值功率 20 mW, 起伏小于 1%, 与计算结果基本一致。

关键词 模式不稳和无规, 输出起伏。

1 固体激光器的稳定性

随着激光技术应用的深化, 激光器输出的稳定性和重复性显得越来越重要^[1~3]。通常氙灯泵浦的固体激光器输出起伏大于 5%。用半导体激光泵浦的固体激光器(DPL)输出起伏通常小于 0.5%^[4~6]。这是由于用于泵浦源的二极管激光器输出稳定, 有较长的寿命, 其辐射谱可通过温控完全落在固体激光器的主吸收峰内, 这种“冷”光泵不仅提高了固体激光器的效率, 还大大降低了固体介质的热畸变, 由半导体激光器泵浦形成固体介质的热沉约为氙灯泵浦的 1/3。另外, 采用端面纵向泵浦形式, 用光学耦合器可使泵浦光与固体激光器的基模 TEM₀₀ 匹配。我们实现了半导体激光泵浦固体激光器的输出和增益开关效应^[7]。本文叙述首次用国产双异质结半导体激光泵浦固体激光器的稳定连续和高重复频率激光输出。

2 半导体激光器泵浦固体激光器实验

半导体激光器泵浦固体激光器实验装置前已叙述^[7], 仍采用端面纵向泵浦技术。国产 DH-LD 线列阵的激光阈值电流为 260 mA, 在不同驱动电流下的辐射光谱和输出功率如图 1 所示。用于连续运转时, 最大输出功率 100 mW, 用于脉冲状态时, 输出功率可达 200 mW。温度调节范围为 $\pm 10^\circ\text{C}$, 以确保二极管激光辐射中心光谱为 808 nm。光耦合由两块非球面透镜组成, 耦合效率 $\sim 70\%$ 。固体激光器为 Nd:YAG 单块振荡器, 晶体长 4 mm, 直径 3 mm, 平凹腔结构, 腔面曲率 $R=50\text{ mm}$, 单横模尺度 $w_0=67\ \mu\text{m}$ 。

当半导体激光器处于连续工作状态, 泵浦 Nd:YAG 激光器的阈值功率为 $P_{th}=3.9\text{ mW}$, 斜率效率为 18%, 最大连续激光输出 TEM₀₀ 模 8 mW, 低阶模 12 mW。用二维

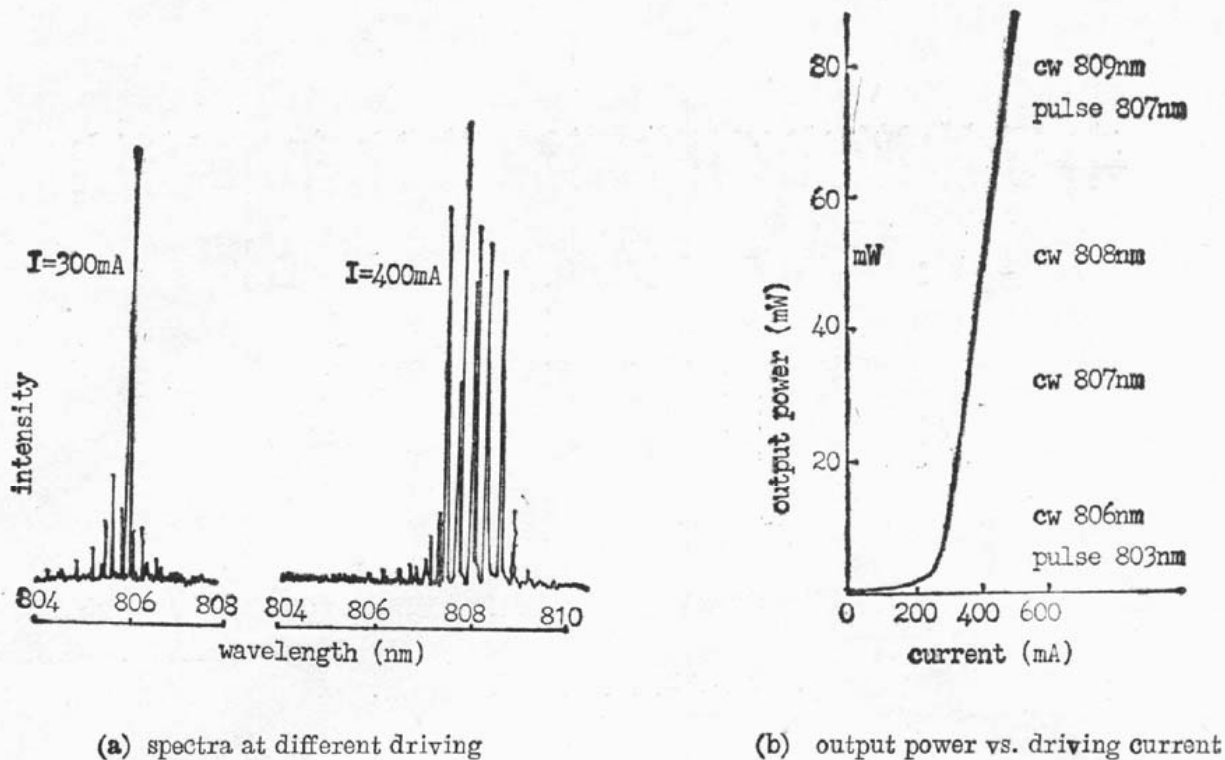


Fig. 1 Output power and spectrum of a CW DH-LD array

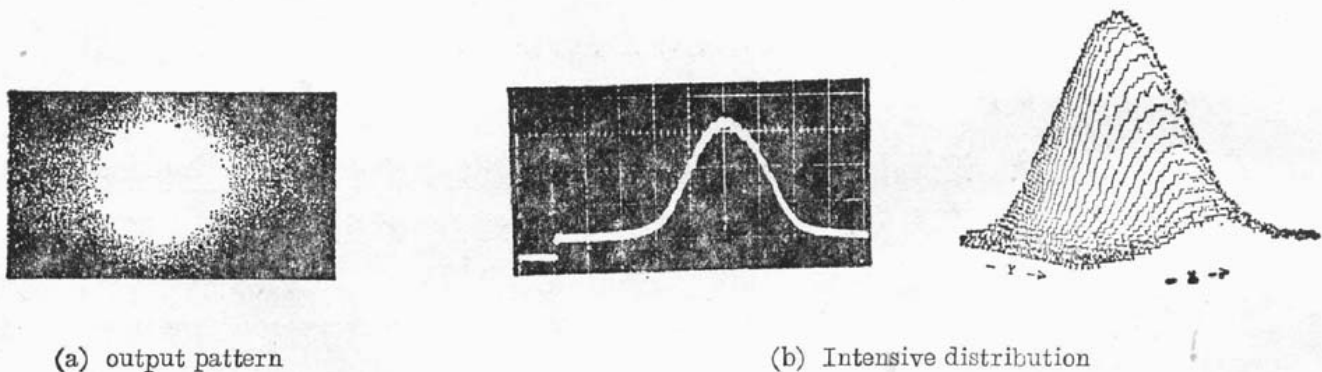


Fig. 2 CW single mode output of LD array pumped Nd:YAG laser

CCD 摄像机和图像处理系统接收激光输出, 得到激光输出 TEM_{00} 模, 其场图及强度分布如图 2 所示. 用灵敏功率计监视输出, 在 1 秒钟、1 分钟和 30 分钟时分别测量输出功率, 起伏小于 0.5%, 当泵浦远大于激光阈值时, 观察到了输出的近轴低阶模振荡, 功率起伏 $\sim 1\%$.

当半导体激光器的电驱动源改为脉冲工作方式时, 脉冲方波缩短到 $4 \mu s$, 增加驱动电流, 使半导体激光功率增至 200 mW, 仅激发 Nd:YAG 激光器的第一个弛豫振荡尖峰, 重复频率为 $10 \sim 50$ kHz, 用快速 PIN 光电探测器监视其激光输出. 电驱动脉冲和相应的 Nd:YAG 激光波形如图 3 所示. 用高灵敏能量计测量激光能量, 并分别对 100 次、1000 次脉冲取样求平均, 与一次取样比较, 起伏小于 1%. 实验表明, 对一定重复频率, 达到稳定激光输出所要求的泵浦功率是一定值. 低于此值泵浦时, 激光脉冲串出现周期性低频幅度调制起伏; 而高于此值泵浦时, 则出现相同重复频率的亚激光脉冲串. 当泵浦光为 200 mW 时, 重复频率调到 50 kHz, Nd:YAG 激光器输出仍为稳定准连续, 每个单脉冲峰值功率为 20 mW. 增加泵浦的重复频率, 固体激光器输出为锯齿波低频幅度调制. 当泵浦频率增加到 100 kHz 时, 固体激光器输出呈现间隙性指数波低频幅度调制, 这是

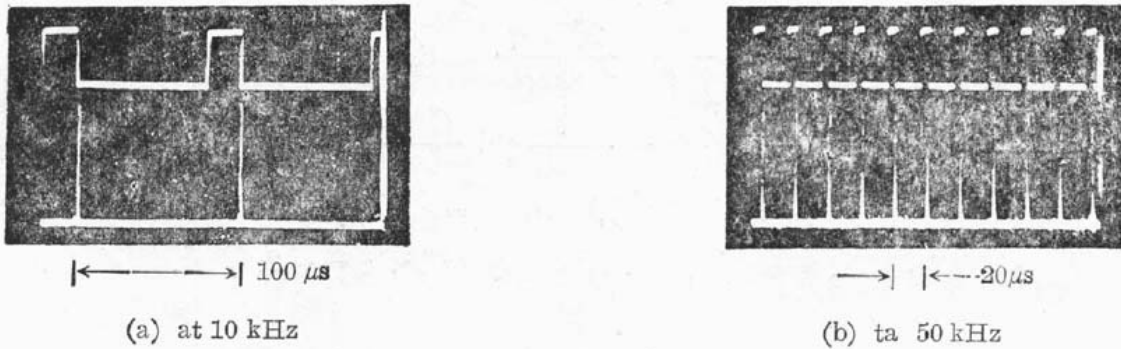


Fig. 3 Oscilloscope traces of LD pumped Nd:YAG laser operated at high repetition rates

由于前一个脉冲激励 Nd 粒子数剩除量和本次单脉冲泵浦 Nd 粒子数的总和不足以形成 Nd:YAG 激光腔振荡所致。

实验所用的驱动电源电压稳定精度达 0.1%。半导体激光器连续工作时，温控精度要求较高，重复频率运转时要求较低，当二极管激光器列阵处于很低重复频率 1~10 Hz 工作时，不用温控也能保持固体激光器稳定输出。

3 计 算

我们已经描述了高斯光束纵向泵浦激发圆柱对称工作物质四能级跃迁的 TEM₀₀ 模振荡模型，推导了反转粒子数密度 N 和腔内总光子数 ϕ 的速率方程。对连续泵浦，由定态条件 $(dN/dt) = 0$ ， $(d\phi/dt) = 0$ 可得

$$\left. \begin{aligned} Rr_p - \frac{c\sigma}{n_d} N\phi\phi_0 - \frac{N}{\tau} &= 0, \\ \frac{c\sigma}{n_d} \iiint N\phi\phi_0 dV - \frac{c\delta}{2n_dL} \phi + \frac{\Omega}{4\pi} \frac{N}{\tau} &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 $R = (P/h\nu_p)$ ， P 为泵浦功率， $h\nu_p$ 为泵浦光子能量， r_p 为泵浦光归一化函数， c 为光速， σ 为受激发射截面， n_d 为介质折射率， ϕ_0 为高斯分布函数， τ 为 Nd 荧光寿命， δ 为双程损耗， L 为介质长度， Ω 为固体激光立体角。在阈值状态下，增益 = 损耗，有

$$\frac{c\sigma}{n_d} \iiint N\phi\phi_0 dV = \frac{c\delta}{2n_dL}. \quad (2)$$

阈值泵浦功率为

$$P_{th} = (h\nu_p\delta/2\sigma\tau) (\sigma/2) (w_0^2 + w_p^2), \quad (3)$$

式中 w_0 为固体激光器基横模尺度， w_p 为泵浦光焦斑尺度。激光输出功率 P_{out} 与光子数 ϕ 的关系为

$$P_{out} = (cT/2n_dL) \phi h\nu_0, \quad (4)$$

式中 T 为输出腔透过率。激光的斜率效率 η_s 为

$$\eta_s = \frac{P_{out}}{P_{abs} - P_{th}} = f_p \frac{T}{\delta} \frac{h\nu_0}{h\nu_p} \quad (5)$$

式中 f_p 为功率吸收系数。对重复频率的第 i 个脉冲泵浦的暂态过程，其速率方程、光子数方程和起始条件可表示为

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= \frac{2Pf}{\pi h\nu_p L w_p^2 N_0} \exp(-u) - \frac{x}{\tau} - \frac{2N_0 c \sigma}{\pi w_0^2 n_d L} \exp(-a^2 u) xy, & (t_{i-1} < t < t_i) \\ \frac{dy}{dt} &= \frac{N_0 c \sigma a^2}{n_d} y \int x \exp(-a^2 u) du - \frac{c\delta}{2n_d L} y + \frac{\Omega w_p^2 L}{8\tau} \int x du, & (t_{i-1} < t < t_i) \\ x_{t=t_{i-1}} &= x^\circ(u), & y_{t=t_{i-1}} = y^\circ(u), \\ x &= (N/N_0), & y = (\phi/N_0), & a^2 = (w_p/w_0)^2, & u = -2\tau^2/w_p^2. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

输出功率的起伏为

$$\Delta P = [\Delta P_e^2 + (f_a \cdot \Delta T_{LD})^2 + (f_n \cdot \Delta T_{YAG})^2]^{1/2}, \quad (7)$$

式中 ΔP_e 为电驱动功率起伏, ΔT_{LD} 为半导体激光器温漂, f_a 为激光二极管光谱漂移引起泵浦光吸收的变化, ΔT_{YAG} 为固体介质的温升, f_n 为介质折射率变化引起固体谐振腔模式的变化. 计算所用的参数以前已叙述, 计算结果如表 1 和图 4 所示. 与实验结果基本一致.

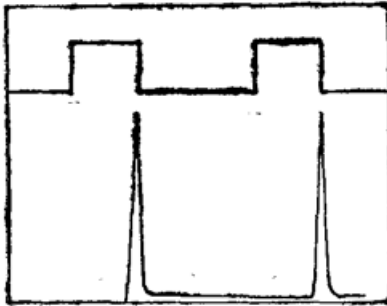


Fig. 4 Calculated result of DPL output at repetition rates of 10 kHz

Table 1 Calculated results of DPL characteristics

特性	P_{th}	η_s	$P_{out,cw}$	$P_{out,pulse}$	ΔP
cal. value	2.8 mW	22%	16 mW	26 mW	0.4%
exp. value	3.9 mW	12%	12 mW	20 mW	0.5%

参加本项工作的还有方祖捷、金志良、屠玉珍、顾德英、封伟忠等人. 实验过程中得到杨惠兵、葛露艳的帮助, 谨表衷心的感谢.

参 考 文 献

- [1] S. Zhu, A. W. Yu, R. Roy, Statistical fluctuations in laser transients. *Phys. Rev. A.*, 1986, **34**(5): 4333~4347
- [2] Mei-Li Shih, P. W. Milonni, J. R. Ackerhalt, Modeling laser instabilities and chaos. *J. Opt. Soc. Am. B.*, 1985, **2**(1): 130~135
- [3] R. P. Fox, G. E. James, R. Roy, Laser with a Fluctuating Pump: Intensity Correlations of a Dye Laser. *Phys. Rev. Lett.*, 1984, **52**(20): 1778~1781
- [4] G. P. A. Malcolm, P. F. Curley, A. I. Ferguson, Additive-pulse mode locking of a diode-pumped Nd:YLF laser. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(22): 1303~1305
- [5] L. R. Marshall, A. D. Hays, R. L. Burnham, Stable 3W cw diode pumped laser at 0.532 μ . in *Technical digests, Conference on Lasers and Electro-Optics* (Optical Society of America, Washington D. C. 1991), paper CFC7
- [6] E. A. P. Chung, T. J. Kane, High-power single-mode diode-pumped Nd:YAG laser using a monolithic nonplanar ring resonants. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(7): 478~481
- [7] Zhou Fuzheng, Shen Liqing, Zheng Guozheng *et al.*, Diode Laser Pumped Solid State Laser. *Sino-Japan Symposium on Lasers*, 1990, Shanghai, China, paper 8A4

Stable output of LD array pumped CW and Quasi-CW Nd:YAG laser

ZHOU FUZHENG SHEN LIQING ZHENG GUOZHENG FAN JIANYUAN

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Shanghai 201800)

(Received 13 September 1991; revised 25 November 1991)

Abstract

A stable CW and quasi-CW Nd:YAG laser was pumped by a homemade DH laser diode (DH-LD) array with CW power of 100 mW and pulse power of 200 mW. The continuous output power of 12 mW and pulse power of 20 mW at repetition rates of 10~50 kHz were obtained, respectively. The power fluctuation is less than 0.5%. The calculated values is agreement with the experimental results.

Key words modeling instabilities, chaos output fluctuation.

CLEO '93 征文通知

CLEO'93 会议将于 1993 年 5 月 2~7 日在美国罗里兰州巴尔的摩(Baltimore)会议中心召开。中国地区节目委员会已开始受理中国地区的征稿工作。征文的主要内容:

- | | |
|-------------------------------|-----------------|
| 1. 激光器件(气体,自由电子,固体,液体,半导体等器件) | 7. 大气、空间和海洋光学 |
| 2. 非线性光学和激光光谱学的应用 | 8. 光开关、逻辑与存储系统 |
| 3. 相位共轭与光致折射器件 | 9. 电-光器件与红外传感技术 |
| 4. 光学材料和制作 | 10. 诊断、分析和工业应用 |
| 5. 激光聚变和强场物理 | 11. 医学和生物学应用 |
| 6. 超快光学与电子学 | 12. 光通信 |

来稿请附中英文 35 字摘要和 200~500 字摘要各两份,其中一份不写单位和姓名,便于审稿。来稿或打印或书写均务必清楚,并在投寄信封上标明“CLEO '93”字样。挂号寄:邮政编码 201800 上海 800-211 信箱《中国激光》编辑部。切勿直接寄往国外,以免延误。

CLEO '93 中国地区节目委员会主席徐至展。通讯地址:上海 800-211 信箱,电话 9528896。

英文征文通知备索,需者可来函来人与《中国激光》编辑部联系。

注意: 中国地区征稿的截止日为 1992 年 10 月 30 日(以投邮日戳为准)

CLEO '93 中国地区节目委员会