

二极管激光器泵浦钕玻璃固体激光器*

周复正 郑桂珍 沈丽青 范滇元

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

提 要

用脉冲输出功率 50 mW, 中心波长为 800 nm 的双异质结激光二极管阵列泵浦磷酸盐钕玻璃激光器, 得到 1.053 μm 波长激光输出。泵浦阈值功率为 9 mW。计算了 DPL 输出的尖峰功率、脉冲宽度和弛豫振荡波形, 与实验结果一致。

关键词: 单块集成固体激光器。

一、引 言

近几年来在国际上, 二极管激光器泵浦的固体激光器(DPL)发展极为迅速, 微型全固态集成化的 DPL 器件已研制成功^[1], DPL 连续锁模输出高达 6W, 锁模倍频输出 3W, 功率起伏小于 0.5%^[2], 锁模经附加外腔压缩得到稳定的 1.5 ps 激光脉冲, 可作为优质注入种籽光源^[3]。近年来国内也开展了 DPL 基础研究, 用日本激光二极管泵浦 Nd:YAG 固体激光器获得成功^[4]。我们首次实现了双异质结激光二极管**泵浦 Nd:YAG 固体激光器的脉冲、连续、高重复频率激光输出和 DPL 的增益开关效应^[5]。本文叙述首次用双异质结激光二极管泵浦 Nd 玻璃固体激光器成功的实验结果和理论计算。

二、双异质结激光二极管泵浦钕玻璃实验

与 Nd:YAG 激光晶体相比, 钕玻璃增益截面系数较小, 但具有较宽和较强的光谱吸收带。实测谱宽大 5 倍, 吸收大 2 倍^[6], 这就大大降低了激光二极管的波长选择和波长控制要求。钕玻璃具有较高的饱和强度, 较低的介质损耗和较大的增益带宽, 可提供较强的腔内强度, 有益于腔内倍频, 有利于形成更窄的调 Q 和锁模脉冲。钕玻璃还具有较长的荧光寿命, 实测寿命比为 $\tau_{\text{Nd:glass}}/\tau_{\text{Nd:YAG}}=1.4$, 有利于增加脉冲模式运转的效率。此外, 玻璃介质有良好的光学均匀性, 便于大尺寸制作, 而且, 由于玻璃的热-光性质变化, 有可能改良玻璃, 达到光程长度随温度“零”变化的特点, 从而提高激光频率的稳定性, 有利于实现高光泵的大型 DPL 器件。由于这些原因, 激光二极管泵浦的钕玻璃固体激光器仍受到相当的重视与发展^[6,7]。

所用国产双异质结锁相阵列二极管激光器(DH-LD), 其激光光谱和 P-I 特性曲线如

收稿日期: 1991年7月16日; 收到修改稿日期: 1991年8月19日

* 本研究为上海自然科学基金资助的项目。

** 中国科学院上海光学精密机械研究所半导体室研制和提供。

图 1 所示。最大输出脉冲功率为 50 mW, 中心波长为 799 nm, 通过温控装置移至钕玻璃的吸收峰波长 800.5 nm 处。DPL 实验装置前已叙述^[7], 仍采用纵向泵浦方式。

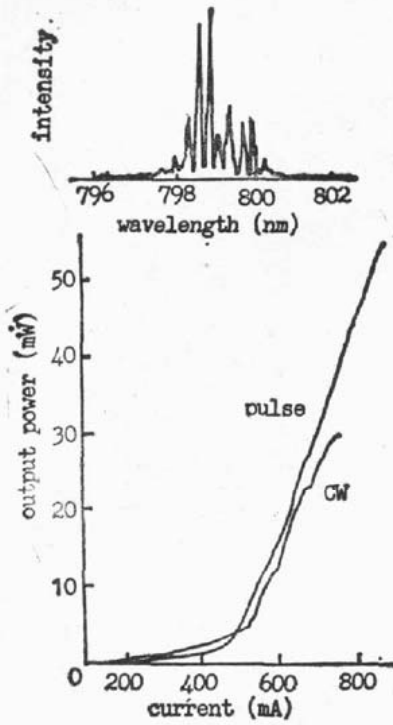


Fig. 1 Emission spectrum and output power of DH-LD array at 800 nm

进行了不同腔结构的 DPL 比较实验。对平行平面腔, 由于模体积较大, 要求泵浦阈值太高而难以实现; 而对双凹腔, 虽然模尺度很小, 但同轴的加工精度要求很高, 微小棒的成品率极低; 平凹腔的单模尺度不大, 而且加工精度要求最低, 对一定横向尺寸的激光棒, 即使面轴偏离中心几度, 仍能在一定位置找到谐振腔共振区域。实验使用的钕玻璃固体激光棒长 3 mm, 直径 5 mm, Nd 浓度 3.5%, 泵浦入射端为平面, 对 1.053 μm 波长高反射和 800 nm 波长增透大于 85%; 输出端为球面, 曲率为 50 mm, 对 1.053 μm 波长高反射和 800 nm 波长部分反射。TEM₀₀ 模尺度为 $\omega_0 = 67 \mu\text{m}$ 。DPL 装置的光-光耦合效率为 70%。

电驱动脉冲、钕玻璃荧光和阈值激光、激光弛豫振荡输出如图 2 所示。图 3 为对应的阈值激光和弛豫振荡尖峰结构时间展开波形。泵浦阈值功率为 9 mW, 第一个尖峰的脉冲宽度为 1.2 μs , 峰值功率为 20 mW, 与同一实验装置的激光二极管泵浦 Nd:YAG 固体激光器比较^[6]。泵浦阈值功率要高 2 倍, 但输出脉冲宽度较窄, 激光尖峰峰值功率提高 4 倍。

此外, 研究了钕玻璃的宽吸收带泵浦特性。用激光中心波长为 790 nm 的量子阱半导体激光器加热 50°C, 使其辐射红移到钕玻璃的主吸收带边 795 nm 处, 泵浦钕玻璃固体激光器, 得到了激光输出, 泵浦阈值功率为 21 mW。用中心波长为 808 nm 的双异质结激光二极管阵列致冷 15°C, 使其辐射蓝移至 806 nm, 在钕玻璃主吸收峰的另一侧带边泵浦,

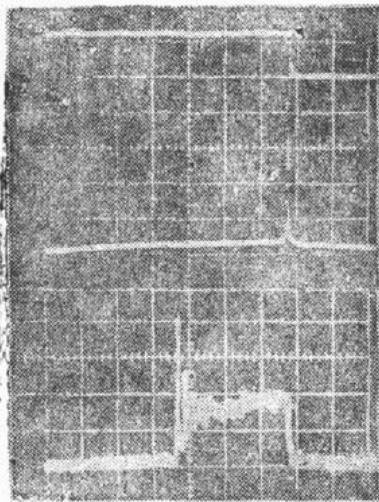


Fig. 2 Electric driving, threshold laser with Nd fluorescence and output of LD pumped monolithic Nd:glass laser (50 $\mu\text{s}/\text{div}$)

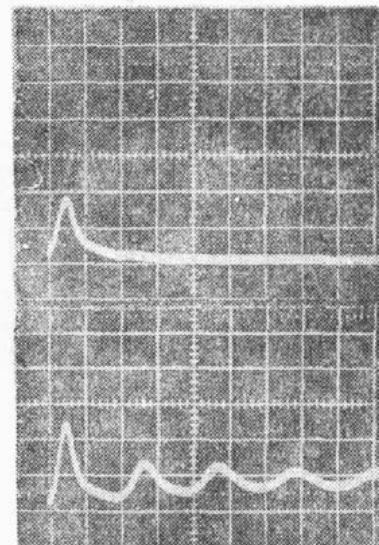


Fig. 3 Temporal profiles of threshold spike and relaxation of LD pumped Nd:glass resonator (50 $\mu\text{s}/\text{div}$)

也得到激光输出, 泵浦阈值为 32 mW。DPL 的泵浦阈值功率随温度的变化, 类似玻璃中 Nd³⁺ 的吸收光谱形状。

三、理论计算

假定泵浦光为高斯光束, 纵向激发圆柱固体激光谐振腔的基横模振荡, 泵浦光及激光束的空间分布归一化函数可分别表示为

$$\gamma_P(r, z) = \frac{2\alpha}{\pi\omega_P^2[1 - \exp(-\alpha L)]} \exp(-\alpha z) \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_P^2}\right), \quad (1)$$

$$\phi_0(r, z) = \frac{2}{\pi\omega_0^2 L} \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_0^2}\right), \quad (2)$$

式中 γ_P 为泵浦光函数, r, z 为柱坐标, ω_P, ω_0 分别为两光束的束腰半径, α 为固体介质对激光二极管的吸收函数, L 为吸收方向的固体介质长度。反转粒子数和光子数随时间的变化为

$$\frac{dN}{dt} = R_0\gamma_P - \frac{N}{\tau} - f_2 \frac{c\sigma}{n_d} N \phi \phi_0, \quad (3)$$

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{c\sigma}{n_d} \iiint N \phi \phi_0 dV - \frac{c\sigma}{2n_d L} \phi + \frac{\Omega}{4\pi} \frac{N}{\tau}, \quad (4)$$

式中 N 为反转粒子数密度, ϕ 为腔内总光子数, c 为光速, τ 为荧光寿命, n_d 为介质折射率, σ 为受激辐射截面, δ 为双程损耗, Ω 为激光束对应的立体角, f_2 为 ${}^4F_{3/2}$ 的总粒子数分配在较低能级的比例, $R_0 = \omega_P N_0 f_2 S_{32} / (S_{32} + A_{30})$, N_0 为激活离子密度, S_{32} 为高能级向亚稳态的无辐射跃迁系数, ω_P 为泵浦速率, A_{30} 为高能级向基态的自发辐射系数。

对脉冲泵浦情况, 系统处于暂态过程, 可通过数值解法求得速率方程和光子数方程的数值解。将方程(3)、(4)中的 $N(r, z)$ 对 z 取平均, 并作以下代换

$$\left. \begin{aligned} x &= N/N_0, \quad y = \phi/N_0; \\ (Pf/h\nu_P) &= R, \quad a^2 = (\omega_P/\omega_0)^2, \quad u = -(2r^2/\omega_P^2), \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

得归一化方程

Table 1 Calculated results of LD pumped Nd:YAG/Nd:glass laser

calculated values	laser	
	Nd:YAG	Nd:glass
pumped threshold power (mW)	2.2	9.5
time of reaching threshold (ms)	~0.3	~0.4
Photons in cavity	9.4×10^{12}	2.4×10^{12}
the first spike power (mW)	4.9	22.6
the first spike width (μ s)	1.6	1.2

$$\frac{dx}{dt} = \frac{2Pf}{\pi h\nu_p L \omega_p^2 N_0} \exp(-u) - \frac{x}{\tau} - \frac{2N_0 c \sigma}{\pi \omega_0^2 n_d L} \exp(-a^2 x) xy, \quad (6)$$

$$\frac{dy}{dt} = \frac{N_0 c \sigma a^2}{n_d} y \int x \exp(-a^2 u) du - \frac{c \sigma}{2n_d L} y + \frac{\Omega \omega_p^2 L}{8\tau} \int x du_0. \quad (7)$$

用 Runge-Kutta 方法解微分方程(6)、(7), 得到激光二极管泵浦钕玻璃和 Nd:YAG 固体激光器的数值解如表 1 所示。计算机模拟 DPL 时间展开波形如图 4、图 5 所示, 与实验结果相符, 计算所用的钕玻璃和 Nd:YAG 参数如表 2 所示。

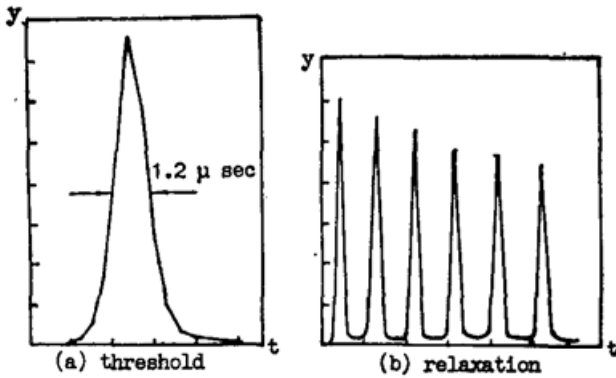


Fig. 4 Calculated temporal waveform of LD pumped Nd:glass oscillator

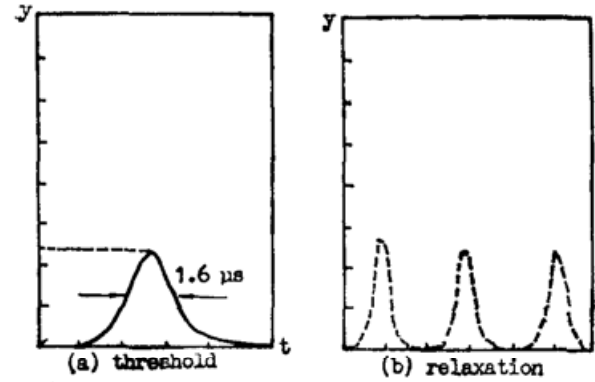


Fig. 5 Calculated temporal waveform of LD pumped Nd:YAG oscillator

Table 2 Parameters for calculating LD pumped Nd:YAG/Nd:glass laser

parameters	materials	
	Nd:YAG	Nd:glass
Nd ³⁺ concentration (cm ⁻³)	1.4 × 10 ²⁰	3.0 × 10 ²⁰
stimulated cross section (cm ⁻²)	3.2 × 10 ⁻¹⁰	3.0 × 10 ⁻²⁰
laser wavelength (μm)	1.064	1.054
fluorescent lifetime (μs)	230	360
scattering loss (cm ⁻¹)	0.005	0.001
quantum efficiency	1	0.4
refractive index	1.8	1.52
pumping wavelength (nm)	808	800
round-trip cavity loss	0.005	0.005
absorbed fraction (cm ⁻¹)	4.9	6.3
coupling efficiency	70%	70%
length of rod (mm)	4.0	3.0
radius of pump beam (μm)	50	50
TEM ₀₀ model sizes (μm)	68	52
burning hole factor	0.39	0.50

方祖捷、金志良、屠玉珍、顾德英、封伟忠等提供了双异质结激光二极管阵列; 徐俊英、肖建伟、张敬明、徐遵图等提供了量子阱半导体器件。实验过程中得到许发明、竺庆春的帮助, 在此表示衷心的感谢!

参 考 文 献

- [1] K. Wallmeroth; *Opt. Lett.*, 1990, **15**, No. 16 (Aug), 903.
- [2] Larry R. Marshall *et al.*; *CLEO'91 Baltimore, U. S. A.*, Paper QFC7.
- [3] G. P. A. Malcolm *et al.*; *Opt. Lett.*, 1990, **15**, No. 22 (Nov), 1303.
- [4] 潘 涌, 沈冠群; 《应用激光》, 1990, **10**, No. 5 (Sep/Oct), 193.
- [5] Zhou Fuzheng *et al.*; *Sino-Japan Symposium on Lasers*, 1990, Shanghai, China, 8A4.
- [6] W. J. Kozlovsky *et al.*; *Opt. Lett.*, 1986, **11**, No. 12, 788.
- [7] M. K. Reed *et al.*; *Opt. Lett.*, 1988, **13**, No. 3, 205.

Diode laser pumped Nd:glass laser

ZHOU FUZHENG, ZHENG GUOZEENG, SHEN LIQING AND FAN DIANYUAN
(Shanghai Institute of Optics & Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

(Received 16 July 1991; revised 19 August 1991)

Abstract

A monolithic Nd:glass laser was pumped by home-made DH-LD Array with pulse power of 50 mW and wavelength of 800 nm. The laser output at wavelength of 1.053 μm was observed. The endpumped threshold is 9 mW. The spike power, pulsed width and relaxation waveform are calculated and agree with experimental results.

Key word: monolithic integrated solid-state laser.