

大功率半导体激光侧面泵浦 Nd:YAG 板条激光器

周复正 陈有明 胡文涛 范滇元 王之江

(中国科学院上海光机所, 上海 201800)

提要 用准连续 60 W 半导体激光侧面泵浦 Nd:YAG 板条激光器, 获得单脉冲能量 3.5 mJ 的激光输出, 脉冲重复频率 1~100 Hz, 能量输出起伏小于 $\pm 1\%$, 光-光效率为 15%, 斜效率为 29%。实现了声光调 Q、电光调 Q、BDN 染料和 LiF 色心晶体被动调 Q 的激光输出, 最大峰值功率超过 100 kW。

关键词 侧面泵浦, 板条激光器, 准连续激光二极管阵列

1 引 言

半导体激光泵浦的固体激光器(DPL)以其高效率、稳定、紧凑、长寿命和全部固态等优点使固体激光器复苏。近年来, 在国际上得到迅猛发展的大功率激光二极管阵列泵浦的固体激光器, 使 DPL 迅速走向市场, 器件的物理性能优势扩展为技术应用优势, 在军事、工业、医学和科学研究的应用上崭露锋芒。高平均功率 1000 W DPL 器件已试用于汽车工业加工; 25 MW 的 DPL 绿光器件实现了机载空-海通讯; 5 MW 的高重复频率 DPL 器件成功地用于飞机和航天器测距, 使大地测绘技术发生革命性飞跃^[1]。海湾战争后, DPL 被西方国家列为战术激光武器的发展重点。瓦量级 LD 泵浦的掺 Tm-, Ho- 和 Er- 中红外激光器, 以其高稳定性和高光束质量的特点, 正用于眼科手术实验; 瓦量级的单横模 DPL 器件已用于精细机械加工和集成电路修复; 输出为 mJ 量级的单纵模调 Q 和锁模 DPL 器件被认为是最理想的注入种籽光源。可以预言, 随着激光二极管阵列(LDA)和 DPL 的发展, 激光产业将跃上一个新台阶。

DPL 的早期研究多采用端面泵浦方式, 这是由于 0.1 mm 尺度的 LD 可作为点光源处理, 通过适当光学耦合能与固体激光器达到良好的模式匹配, 因此激光阈值低, 输出效率高。随着大功率激光二极管阵列的发展, 1 cm 尺度的一维、二维 LDA 端面泵浦碰到两个难题: 一是面光源纵向光学耦合系统变得更加困难复杂, 对光学和机械精度要求越来越高; 二是端面泵浦光的高功率密度使局部固体激光介质产生热透镜和热致双折射效应。

侧面泵浦模式复盖度差, 激光阈值高, 效率低, 但是光学耦合简单, 结构紧凑, 热效应小且均匀, 适合大功率线阵和面阵的 LD 泵浦, 可获得大功率激光输出。近年来, 利用固体激光多次反射折叠腔以增加占空比, 或利用窄缝泵浦内侧全反射方式以增加吸收, 均获得较好的侧面泵浦效果^[2]。我们已经实现了 LD 端面泵浦固体激光器输出连续单纵模和调 Q 单纵模^[3], 本文报

道准连续大功率半导体激光侧面泵浦固体激光器及其调 Q 的实验结果。

2 大功率 LDA 侧面泵浦 Nd : YAG 板条激光器实验

实验装置如图 1 所示。泵浦光源为美国 SDL 公司制造的激光二极管列阵, 准连续输出最大平顶峰值功率为 60 W, 发光源尺寸为 $10 \text{ mm} \times 1 \text{ }\mu\text{m}$, 中心激射光谱为 804 nm, 谱宽为 2.1 nm, 实验中将 LDA 加温 $10 \text{ }^\circ\text{C}$, 使激射波长移至 Nd : YAG 的主吸收峰附近。我们自行研制了大电流方波脉冲驱动器, 采取了有效的措施来保护激光二极管。首先是设置了限流装置, 控制最大输出电流不超过二极管的损坏阈值; 其次, 设置了多级电源滤波器和电源开关软启动电路, 有效地去除了电源的浪涌和尖峰脉冲; 另外, 在电流脉冲发生器中加入防止脉冲前沿过冲的电路, 使方脉冲的前后沿都不产生尖峰, 确保激光二极管不受浪涌或尖峰的损伤。实验中, 驱动电流置 70 A 时, LDA 的输出功率为 57 W, 驱动电脉冲的宽度为 $400 \text{ }\mu\text{s}$, 重复频率在 $1 \sim 100 \text{ Hz}$ 的范围内可调; 最大单脉冲泵浦能量为 23.2 mJ。

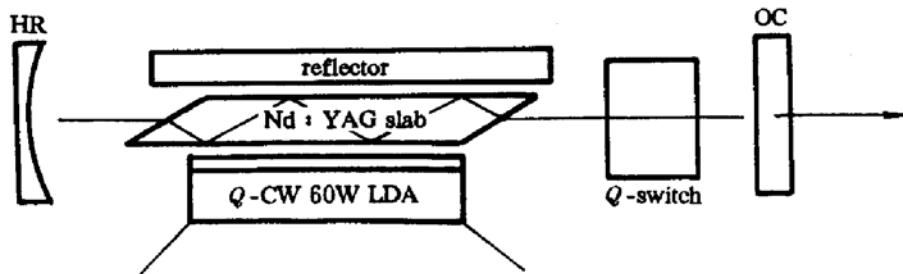


Fig. 1 Schematic of the Q -switched Nd : YAG slab laser side pumped by a quasi-CW 60 W LDA

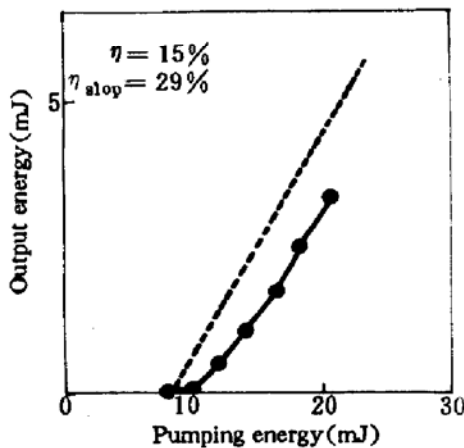


Fig. 2 A plot of the data and the predicted performance curve for the 2 mm thick Nd : YAG laser slab with a 88% reflective output mirror. The experimental data agrees well with the predictions

Nd : YAG 板条几何尺寸为 $16 \times 3 \times 2 \text{ mm}^3$, Nd 掺杂浓度为 1 wt-%, 板条两端切成布儒斯特角, 使光束在激活介质形成四次反射, 设计了精密机械调整机构, LDA 贴近板条的一个侧面, 间距小于 0.5 mm, 板条另一侧面紧贴一块对 808 nm 全反射的模板, 使剩余泵浦光再次被介质吸收。固体激光器腔长为 6 cm, 对 $1.064 \text{ }\mu\text{m}$ 全反射端采用曲率半径为 3 m 的凹面腔镜, 输出端为对 $1.064 \text{ }\mu\text{m}$ 透过率为 12% 的平面腔镜。

总体实验结果如图 2 所示, 泵浦阈值功率为 15 W, 相应阈值泵浦能量为 6 mJ, Nd : YAG 最大单脉冲激光能量为 3.5 mJ, 相应 LDA 泵浦功率为 57 W (22.8 mJ)。光-光转换效率为 15%, 激光斜效率为 29%。DPL 运转重复率为 $1 \sim 100 \text{ Hz}$ 。激光输出的能量起伏小于 1%。

3 LDA 侧面泵浦 Nd : YAG 板条激光器调 Q 实验

在上述 LDA 侧面泵浦 Nd : YAG 板条激光自由振荡装置中, 插入 Q 开关元件, 实现了声

光、电光、染料和色心晶体调 Q 激光输出。DPL 器件运转重复频率为 $1\sim 100\text{Hz}$ 。

3.1 声光调 Q

声光介质为 ZF6 玻璃,声光作用长度为 16 mm ,插入损耗小于 1% ,压电换能器为 LiNbO_3 晶体,电声调制频率为 80 MHz ,射频驱动功率为 3 W ,一级衍射效率为 17% 。声光调 Q 激光脉冲波形如图 3 所示,脉冲宽度为 20 ns (FWHM),单脉冲激光能量为 1.5 mJ ,脉冲峰值功率为 75 kW ,波形起伏小于 1% 。采用对 632.8 nm 布拉格一级衍射效率达 46% ,调制频率 40 MHz ,声光作用长度为 36 mm ,并联耦合的声光调制器。实验获得了单脉冲能量 2.2 mJ ,脉冲宽度 20 ns (FWHM)的调 Q 激光输出,其最大脉冲峰值功率超过 100 kW 。

3.2 电光调 Q

电光调制器的材料为 LiNbO_3 ,为了消除电光晶体自然双折射的影响,采用 x 方向加电场的横向工作方式,晶体的两个通光面镀 $1.064\text{ }\mu\text{m}$ 的增透膜,半波电压为 3600 V 。电光调 Q 激光脉冲波形如图 4 所示,脉冲宽度为 20 ns (FWHM),单脉冲激发能量为 1.13 mJ ,脉冲峰值功率为 56 kW ,波形起伏小于 3% 。

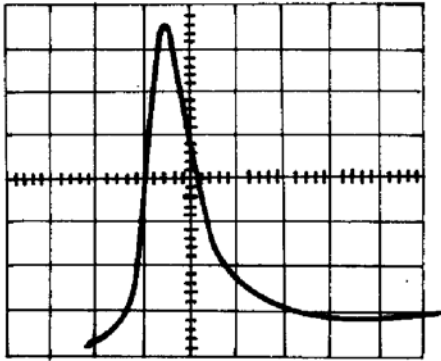


Fig. 3 Superposition of 10 A-O Q -switched pulses

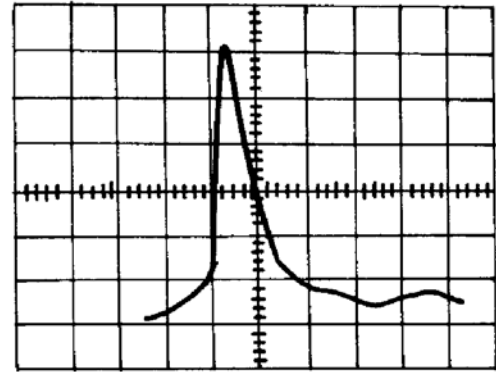


Fig. 4 The waveform of the E-O Q -switched pulse

3.3 色心调 Q

用 $\text{F}^{2-}:\text{LiF}$ 色心晶体作为饱和吸收体,晶体长度为 5 mm ,对 $1.064\text{ }\mu\text{m}$ 的弱光透过率为 76% 。色心调 Q 激光脉冲宽度 12 ns ,单脉冲能量 0.4 mJ ,峰值功率 33 kW ,起伏小于 5% 。

3.4 染料调 Q

用均匀混合在醋酸纤维树脂内的 BDN 染料片作为被动调 Q 元件,固态薄膜元件的厚度小于 0.01 mm ,对 $1.064\text{ }\mu\text{m}$ 波长的非饱和吸收透过率为 66.9% 。染料调 Q 激光脉冲宽度为 10 ns ,单脉冲激光能量为 0.44 mJ ,峰值功率为 44 kW ,波形起伏较大。

4 分析与讨论

LDA 侧面泵浦固体激光器的斜效率和激光输出能量可分别表示为^[4]

$$\eta_s = \eta[1 - \exp(-\beta a)] * \ln R_m / \ln [R_m(1 - \delta)] \quad (1)$$

$$E_{\text{out}} = \eta_s(E_p - E_{\text{pth}}) \quad (2)$$

以上各式中, a 为泵浦光的吸收长度, β 为增益介质的吸收系数, R_m 为输出腔镜的反射率, δ 为腔的损耗系数, η 为泵浦耦合效率, E_p 和 E_{pth} 分别为泵浦能量和阈值泵浦能量。将设计参数和实验数据代入以上二式,得到 Nd:YAG 激光输出与 LDA 泵浦输入关系如图 2 直线所示。斜效率 η_s

= 32%, 计算值与实验结果基本相符。

本实验采用 B' 角窄板条结构实现多次内侧面全反射, 增加泵浦耦合度, 并采用大曲率半径的平凹短腔增加基模尺寸, 得到了大功率 LDA 侧面泵浦 Nd: YAG 光-光效率为 15% 的结果, 优于国外 80 年代末期同类器件光-光效率为 10% 的结果^[5]。增加泵浦光和固体激光之间的空间覆盖度, 增加激活介质中单位体积的泵浦光功率密度, 是提高光-光转换效率和斜效率的有效途径。我们设计了高折叠内侧面全反射侧面泵浦装置和端面-侧面联合泵浦装置, 估计光-光效率可超过 30%。

四种 DPL 调 Q 实验的结果表明, 在弱光泵的情况下, 声光调 Q 由于插入损耗小, 激光输出特性明显优于电光、色心和染料调 Q , 但声光 Q 开关速度较慢, 很难得到更窄的脉冲。电光 Q 开关速度很快, 可以得到窄脉冲, 如用 APD 放电代替本实验中的热阴极闸流管电路, 估计 DPL 电光调 Q 脉宽小于 10 ns。固体染料片被动调 Q 方法简单, 且可得到窄激光脉冲, 但对高重复频率 DPL 器件, 激光反复作用在染料片的一个固定点上, 漂白作用导致激光输出起伏很大。实验证明: 色心晶体调 Q 兼顾了窄脉宽和输出稳定的双重优点, 又省掉了开关电路, 有着重要的发展和应用前景, 特别是在军用战术激光武器和航天遥感测绘技术上, 要求激光器小型、重量轻、耗能小、抗电磁干扰且互不干扰, DPL 色心晶体调 Q 高重复频率器件显示了极大的技术优势。作为进一步研究, 我们将寻找 F^{2-} : LiF 晶体的色心浓度、晶体插入损耗和激光功率密度、作用区空间光强分布的关系, 研究色心晶体被动调 Q 的饱和吸收瞬态变化过程, 确定最佳匹配参数, 研制实用的 DPL 色心晶体调 Q 器件。

致谢 在研究过程中, 得到李植森、沈丽青、陈秋水、朱三又、杨香春、陈绍和、范瑞英、林礼煌、竺庆春等人的帮助, 谨表衷心感谢。

参 考 文 献

- 1 J. B. Garvin. Mapping new and old worlds with laser altimetry. *Photonics Spectra*, June 1993. 7
- 2 T. M. Baer, D. F. Head, P. Gooding. Performance of Diode-pumped Nd: YAG and Nd: YLF Lasers in a Tightly Folded Resonator Configuration. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1992, QE-28(4): 1131~1138
- 3 周复正, 马建伟, 沈小华. 二极管激光泵浦固体激光器的调 Q 研究. 世界光学大会, 1993 年 9 月, 上海
- 4 Newton Sims. Optimization of rod diameter in solid state lasers side pumped with multiple laser diode arrays. *SPIE, Solid State Laser III*, 1992, 1627: 153
- 5 M. K. Reed, W. J. Kozlovsky, R. L. Byer. Diode-laser-array-pumped neodymium slab oscillators. *Opt. Lett.*, 1988, 13(3): 204~206

High Power Laser Diode Array Side-pumped Nd: YAG Slab Laser

Zhou Fuzheng Chen Youming Hu Wentao Fan Dianyuan Wang Zhijiang

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

Abstract The pulses with energy of 3.5 mJ, repetition rate of 1~100 Hz and energy fluctuation less than 1% have been obtained of a slab Nd: YAG laser pumped by a quasi-CW 60 W laser diode array. The optical to optical efficiency is 15% and slop efficiency is 29%. The Q -switchings of the DPL involving A-O, E-O, and color center crystals and dye have been realized respectively. The maximum peak output power of the laser is 100 kW.

Key words LD side pumping, slab laser, quasi-CW laser diode array (Q -CW LDA)