

LD泵浦 Nd : YVO₄ 激光器的基横模、高重复 频率声光调 Q *

李传东 胡文涛 周复正 林礼煌 张正泉 徐至展

(中国科学院上海光机所, 上海 201800)

提要 用国产激光二极管, 实现了连续泵浦 Nd : YVO₄ 激光器声光调 Q, 以及单纵模预激光调 Q 输出。在较小的泵浦功率下, 得到了 2.4% 的光-光转换效率, 斜效率为 12.5%, 脉冲宽度为 60 ns, 激光为基横模输出。将实验结果与 LD 泵浦 Nd : YAG 激光器进行了比较。

关键词 DPL, Q 开关

1 引言

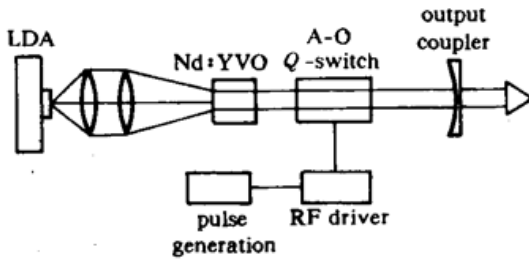
近年来, 半导体激光泵浦固体激光器(DPL)由于其极具潜力的应用价值而倍受关注, 发展极为迅速。连续泵浦调 Q 激光器具有高重复频率、高平均功率和高光-光转换效率等优点, 利用激光二极管作为泵浦源, 可以实现这类器件的小型化, 在激光雷达和光电对抗等方面具有实际应用价值。DPL 的发展也在很大程度上带动了激光材料科学的发展, 并使某些在闪光灯泵浦条件下不适合作为激光工作介质的材料重获新生, 钕酸钇钒(Nd : YVO₄)就是其中之一。Nd : YVO₄ 具有高吸收系数、宽吸收光谱、高受激发射截面等优点, 但由于其过低的热导系数而沉寂数年, 随着 DPL 技术的发展, 它的诸多优点得到充分发挥。

国际上对 LD 泵浦 Nd : YVO₄ 激光器的研究比较热门, 用声光 Q 开关获得了亚纳秒的调 Q 激光脉冲^[1]。我们利用国产的激光二极管曾实现 Nd : YLF 准连续调 Q^[2] 以及连续泵浦 Nd : YAG 高重复频率调 Q^[3], 并进行了准连续泵浦 Nd : YVO₄ 激光器的实验研究^[4]。本文报道用国产多量子阱激光二极管阵列(MQW-LDA)泵浦 Nd : YVO₄ 固体激光器的实验结果。利用较小的泵浦区域作为选基横模的“软光阑”, 在连续和准连续泵浦条件下研究了调 Q 特性及单纵模预激光调 Q 工作特性, 并将其结果与 LD 泵浦 Nd : YAG 激光进行了比较。

2 实验装置

图 1 为实验装置图, 泵浦源为多量子阱线列阵激光二极管, 耦合系统为简单的双非球面镜。声光调制器的声光介质为 ZF₆ 玻璃, 作用长度 17 mm, 有效作用口径为 500 μm, 衍射效率

* 国家自然科学基金资助项目。



在驱动电流 2 A 时为 15%。连续调 Q 时,触发电脉冲由一脉冲源提供,重复频率为 1 kHz, 4 kHz 和 10 kHz;准连续运转时,触发信号由驱动电流监视信号经过处理而得,重复频率为 10 Hz,泵浦光的脉宽为 1 ms。

两块 Nd : YVO₄ 晶体的参数为: 钕掺杂浓度为 1 at-%, 尺寸为 3×3×3 mm 和钕掺杂浓度为

2 at-%, 尺寸为 3×3×1 mm; 两块介质的镀膜相同, 一端镀 808 nm 增透, 1.06 μm 全反膜, 另一端为 1.06 μm 增透膜。输出镜有两种, $T = 1.5\%$, 曲率半径 $R \approx 1\text{ m}$; $T = 3.1\%$, $R = 1.5\text{ m}$ 。

3 实验结果

3.1 准连续调 Q

准连续运转有利于研究 Nd : YVO₄ 激光器的调 Q 运转特性, 图 2 为准连续的实验结果。空腔条件下, 对钕掺杂浓度为 1 at-%, 尺寸为 3×3×3 mm 的晶体, 在输出镜为 1.5% 和 3.1% 时基横模输出的斜效率分别为 9% 和 15%, 泵浦光的峰值功率为 269 mW 时, 脉冲宽度为 60 ns。这与在 LD 泵浦 Nd : YAG 得到的结果相比是低的, 原因是基横模输出以及低的泵浦功率。文献[3]中提到, 在泵浦光功率较高时, 输出由基横模变为多横模, 斜效率变大。我们也利用相同的泵浦光耦合系统, 在 Nd : YVO₄ 激光器上获得了 28.8% 的斜效率。由于我们所用的耦合系统未对泵浦光束进行有效的整形, 多模输出时泵浦光与腔模的匹配程度要比单模输出时高[4]。

实验测得的动态(调 Q)和静态(不调 Q)的能量比为 11%, 这也远低于以前在准连续 Nd : YAG 激光器[3]上获得的结果。差异的原因除了上面提到的基横模输出以及低的超阈值外, 还有一个重要的原因是泵浦周期过长。实验中每个泵浦周期的持续时间是 1 ms, 这个时间相对于 Nd : YVO₄ 的上能级寿命(Nd 掺杂 1 at-% 时, $\tau = 90\ \mu\text{s}$, 2 at-% 时, $\tau = 50\ \mu\text{s}$)而言太长。从示波器上观察到的荧光强度表明, Q 开关打开之前, 荧光强度已不再随时间而增大, 说明此时单位时间激发到上能级的粒子数与经过自发辐射而跃迁到下能级的粒子数已达到动态平衡, 由调 Q 理论可知, 这不利于提高转换效率。从示波器上来看, 泵浦光功率为 260 mW 时, 在泵浦光开始后 340 μs 左右, 荧光的辐射强度已趋于稳定, 在此之后的泵浦功率对调 Q 输出能量几乎没有贡献。因此对于连续泵浦调 Q Nd : YVO₄ 激光器而言, 比较理想的重复频率是 2 kHz 至 3 kHz 之间。而且从这个数据来看该晶体的上能级寿命并非 90 μs, 而是 105 μs 左右, 可能是掺钕的浓度低于 1 at-%。

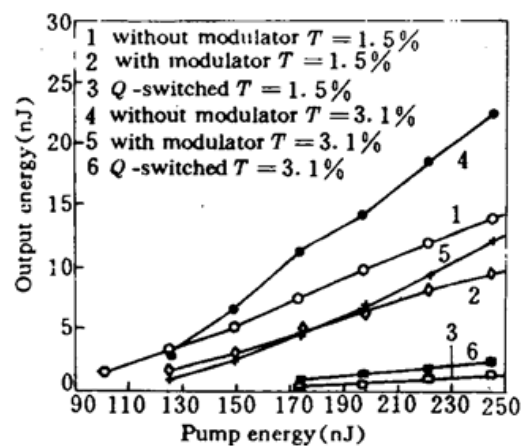


Fig. 2 Output energy as a function of pumping energy for quasi-CW pump

Fig. 2 Output energy as a function of pumping energy for quasi-CW pump

由于 Nd:YVO₄ 的吸收系数很高 ($31.4\% \text{ cm}^{-1}$), 激光腔内有效增益区极薄, 因而非常有利于单纵模的获得, 国际上也曾在这方面进行了较多的研究。我们曾经在类似的 DPL 器件上研究 Nd:YVO₄ 激光器的性质^[4], 发现由于泵浦光与腔模激光的模式匹配欠佳, 单纵模只能在泵浦功率比较低的条件下才能获得, 高泵浦功率时, 随着高阶横模的出现, 单纵模运转遭到破坏。因此, 基横模对实现单纵模运转是极为重要的。实验中选用曲率半径高达 1 m 和 1.5 m 的腔镜作为输出镜, 在等效腔长为 40 mm 时, 腔模在 Nd:YVO₄ 晶体中的光腰半径为 270 μm , 这远比晶体中泵浦光的光腰半径 ($80 \times 160 \mu\text{m}$) 为大, 因此这种腔结构只允许基横模起振。

在基横模输出的条件下, 实验中很容易在示波器上观察到与文献[5]中相同的激光输出波形, 而且在泵浦光的超阈度较高 (约为 1.5) 时仍能保持这种激光波形。根据激光理论, 初步判断此时 Nd:YVO₄ 激光器已处于单纵模状态, 显示了 LD 泵浦 Nd:YVO₄ 激光器在获得单纵模激光输出方面的优势。我们进而进行了单纵模预激光调 Q 的实验, 在泵浦功率的超阈度为 2 时, 适当控制声光调制器的驱动功率 (1.2 W), 可以在示波器上观察到与文献[5]中完全相同的预激光调 Q 波形。

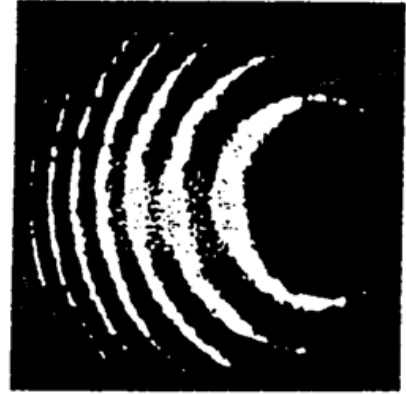


Fig. 3 Intensity distribution on 2-D CCD

由于 Nd:YVO₄ 晶体的上能级寿命 (90 μs) 远低于 Nd:YAG 的, 因此预激光的时间设置也可以比较短, 实验中为 840 μs , 用快响应光电二极管测得的调 Q 脉冲的宽度为 100 ns。利用分辨率为 $3 \times 10^9 \text{ Hz}$ 的法布里-珀罗标准具结合 CCD 二维图像处理观察干涉环的强度分布 (图 3), 激光器的纵模间隔 $c/2Ln = 3.75 \times 10^9 \text{ Hz}$, 证实了此时激光的输出是单纵模的。

相比之下, 钕掺杂浓度 2 at-%, $3 \times 3 \times 1 \text{ mm}$ 的晶体激光输出特性就显得不太理想, 单纵模运转的性能相对于掺杂 1 at-% 而长度较长的晶体也没有显著的提高, 产生这种差异的原因是因为该晶体对泵浦光的吸收比较低。因此, 在随后的连续泵浦的调 Q 实验中, 我们只选用了钕掺杂浓度 1 at-%, $3 \times 3 \times 3 \text{ mm}$ 的晶体作为激光工作物质。

Table 1 Relation between repetition rate and slop efficiency for defferent output couples

Pumping power (mW)	Output coupler (%)	Slop efficiency (%)			
		Empty	1 kHz	4 kHz	10 kHz
197	1.5	8.75	1.25	1.25	2.92
209	3.1	20.83	5	8.33	12.5

3.2 连续调 Q

连续泵浦时, Q 开关的重复频率分别为 1 kHz, 4 kHz 和 10 kHz, 激光输出仍然保持基横模。输出镜的透过率为 1.5% 和 3.1% 时, 输出平均功率和脉冲宽度与泵浦功率的关系如图 4, 图 5。实验结果表明, 输出镜的透过率 $T = 3.1\%$, 比 $T = 1.5\%$ 能获得更大的平均输出功率。

在脉冲宽度上, $T = 1.5\%$ 时脉宽与重复频率没有明显的变化关系; 而 $T = 3.1\%$ 时, 脉宽随重复频率的提高而明显变宽, 虽然平均输出功率有所提高, 脉冲的峰值功率却有所下降。在相同的泵浦功率下, 脉冲的半高宽前者比后者更窄。

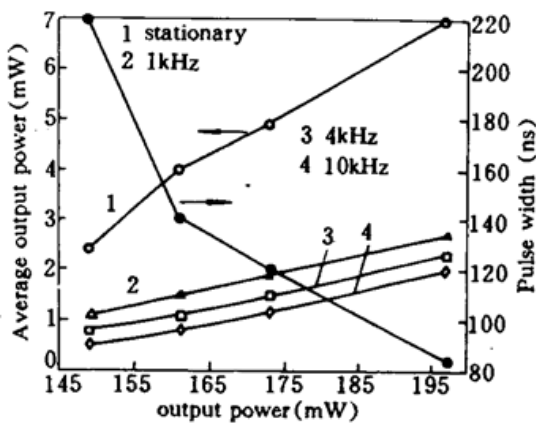


Fig. 4 Average output power and pulse-width as a function of pumping power for different repetition rates. The output mirror is $T = 1.5\%$, $R = 1\text{ m}$

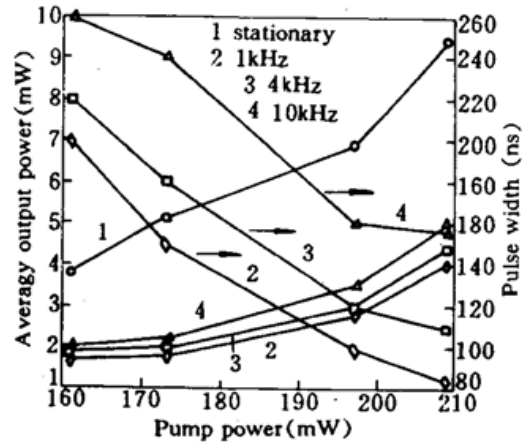


Fig. 5 Average output power and pulse-width as a function of pumping power for different repetition rates. The output mirror is $T = 3.1\%$, $R = 1.5\text{ m}$

泵浦功率 $P_p = 209\text{ mW}$, $T = 3.1\%$ 时的斜效率为 12.5% , 光-光转化效率为 2.4% , 这个数值与我们以前在 LD 泵浦 Nd:YAG 激光器上得到的结果^[3](光-光效率 4%) 相比是比较低的。但考虑到本实验中较低的泵浦光功率以及基横模输出, 若将泵浦光功率拟合到 1 W , 该器件的光-光效率将达到 10.4% , 接近文献^[3]中空腔时 Nd:YAG 激光器的多横模连续输出功率。由此可见, LD 泵浦的 Nd:YVO₄ 激光器的性能在中低功率泵浦时, 要优于 Nd:YAG 激光器。表 1 列出了 $T = 1.5\%$ 和 $T = 3.1\%$ 时, 不同重复频率得到的斜效率。

将准连续泵浦和连续泵浦的实验结果进行比较我们发现, 在调 Q 运转时, 连续泵浦的光-光效率比准连续泵浦时要高得多。一个可能的原因是在连续调 Q 时, 上次调 Q 时剩余的反转粒子数可以对下次调 Q 脉冲有所影响, 提高了反转粒子的利用率。另一个更重要的原因, 我们认为是在连续泵浦的条件下, 由于 YVO₄ 晶体的热导系数比较低。在泵浦光的作用下产生热透镜效应, 使腔基模的光腰在晶体中有所缩小, 使之与泵浦光匹配得更好, 提高了泵浦光的利用率。其他的实验小组已在相同的器件上观察到了在激光刚开始形成以后较长的一段时间内 ($20\sim 40\text{ s}$ 左右), 输出激光的横模结构随时间有一个明显的变化过程。这也说明了热效应在 Nd:YVO₄ 激光器中的影响。

4 结 论

通过将实验结果与 Nd:YAG 激光器进行比较可以发现, Nd:YVO₄ 激光器无论是在单纵模还是在连续泵浦高重复频率调 Q 方面都有较大的优势。但 Nd:YVO₄ 晶体中存在着比较严重的热透镜效应, 这在连续泵浦的 Nd:YVO₄ 激光器的实际设计中应当引起足够的重视。

参 考 文 献

- 1 H. Plaessmann, K. S. Yamada, C. E. Rich *et al.*. Subnanosecond pulse generation from diode-pumped acoustic-optical Q-switched solid-state lasers. *Appl. Opt.*, 1993, 32(33): 6616
- 2 周复正, 朱三义, 马建伟等. 量子阱激光二极管泵浦 Nd:YLF 固体激光器的调 Q. *中国激光*, 1992, 19(12): 881
- 3 胡文涛, 周复正, 陈有明等. LD 泵浦 Nd:YAG 激光器的连续激光输出和高重复频率调 Q. *光学学报*,

1994, 14(12): 1281

- 4 李传东, 胡文涛, 周复正等. LD端面泵浦Nd:YVO₄激光器及其高阶横模的工作特性. 中国激光, 1995, A22(2): 81
- 5 陈有明, 胡文涛, 周复正等. LD泵浦Nd:YAG激光器单频预激光调Q. 光学学报, 1995, 15(1): 81

TEM₀₀ Mode, High-repetition Rate Q-switching of LD Pumped Nd:YVO₄ Lasers

Li Chuandong Hu Wentao Zhou Fuzheng Lin Lihuang
Zhang Zengquan Xu Zhizhan

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

Abstract Pumped by a home-made diode-laser, Q-switching and single-axial mode pre-lasing Q-switching are achieved. For lower pumped power, optical-to-optical transverse efficiency and slop efficiency are 2.4% and 15% respectively when the output is TEM₀₀ mode. Comparison is made to the LD pumped Nd:YAG laser.

Key words DPL, Q-switch