

激光二极管直接耦合泵浦的 Nd:YVO₄ 激光器 连续运转和高重复率被动调 Q 运转 *

王军民 李瑞宁 杨炜东 谢常德 徐天华 **

(山西大学光电研究所, 太原 030006)

摘要 以 500 mW 激光二极管直接耦合泵浦 Nd:YVO₄, 实现了 1064 nm 连续激光运转。泵浦阈值功率约 22 mW, 获得基横模最大输出约 172 mW, 相应的斜效率为 35.8%; 在 Nd:YVO₄ 激光谐振腔内采用 Cr⁴⁺:YAG 作为饱和吸收体, 实现了激光二极管连续泵浦 Nd:YVO₄ 高重复率被动调 Q 激光运转。获得了脉宽约 114 ns 的 1064 nm 调 Q 激光脉冲, 重复率高达 380 kHz。

关键词 激光二极管泵浦的 Nd:YVO₄ 激光器, 直接耦合泵浦(DCP), Cr⁴⁺:YAG 晶体, 被动 Q 开关

1 引 言

激光二极管泵浦的固体激光器, 特别是小型乃至微型固体激光器, 由于具有小体积、高效率 and 广泛的应用前景, 近年来得到了迅猛发展, 成为激光器件领域中的一个倍受关注的热点。

激光二极管连续泵浦的调 Q 固体激光器具有高重复率、高光光转换效率等特点, 在激光测距、光电对抗等方面有一定的优越性。采用电光器件或声光器件主动调 Q 的方法需要高压源或射频信号源通过开关电路驱动, 系统较为复杂, 在某些情况下应用不太方便。采用饱和吸收体被动调 Q 的方法则免去了高压源或射频信号源及开关电路, 结构相对较简单, 从而可使得激光二极管泵浦的调 Q 激光器拓宽其应用范围。一些有机染料(如 BDN 等)及色心晶体(如 Li:F₂ 等)在一微米左右表现出饱和吸收特性, 可以作为掺 Nd³⁺ 激光介质的饱和吸收型被动 Q 开关。但有机染料的热稳定性和光化学稳定性较差, 容易分解变质; 色心晶体在运转一段时间后则出现褪色的问题。近年来发展起来的一些掺杂 Cr⁴⁺ 的晶体材料(如 Cr⁴⁺:YAG, Cr⁴⁺:GSGG 等), 在一微米左右也表现出类似于色心晶体的饱和吸收特性, 且较有机染料及色心晶体更稳定, 特别适合于作为掺 Nd³⁺ 激光介质的饱和吸收型被动 Q 开关。

激光二极管泵浦的、采用 Cr⁴⁺:YAG 晶体作为饱和吸收型被动 Q 开关的 Nd:YAG 激光器^[1,2]和饱和吸收自调 Q 的 Cr, Nd:YAG 激光器^[3]已取得了较大进展。但迄今为止尚未见有关激光二极管泵浦、采用 Cr⁴⁺:YAG 作为饱和吸收型被动 Q 开关的 Nd:YVO₄ 激光器报道。本文介绍以激光二极管直接耦合泵浦 Nd:YVO₄ 激光器的连续运转和采用 Cr⁴⁺:YAG 晶体作为饱

* 本工作得到山西省科委科技攻关项目(951029)经费的部分资助。

** 西南技术物理研究所, 成都 610064。

收稿日期: 1996 年 1 月 15 日; 收到修改稿日期: 1996 年 3 月 15 日

和吸收体高重复率被动调 Q 运转的一些初步的实验结果。

2 实验装置

激光二极管连续泵浦的饱和吸收被动调 Q Nd:YVO₄ 激光装置见图 1。连续运转实验的装置与之差别仅在于没有谐振腔中的 Cr³⁺:YAG 晶体。

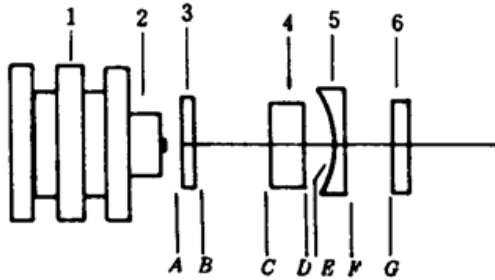


Fig. 1 Diagram of the passively Q -switched Nd:YVO₄ laser pumped by a laser diode. The schematic of direct-coupled pump (DCP) is used

1: heat sink; 2: 500 mW laser diode; 3: α -cut Nd:YVO₄ chip ($3 \times 3 \times 1$ mm); 4: Cr³⁺:YAG chip ($\phi 8 \times 4$ mm); 5: output coupler ($\phi 10 \times 2$ mm, $r = 20.6$ mm); 6: filter; A: $T = 93\%$, 809 nm, $R = 99.8\%$, 1064 nm; B, C, D and F: anti-reflection coating for 1064 nm; E: $T = 3.5\%$, 1064 nm; G: $R = 99.8\%$, 809 nm, $T = 98\%$, 1064 nm

Nd:YVO₄ 晶体属于正方晶系, D_{4h} 空间群, 正单轴晶体。实验中所使用的 Nd:YVO₄ 晶片是由福州科风激光有限公司提供的。Nd 离子掺杂浓度约为 1 at.-%, 1064 nm 处受激发射截面的典型值为 $25 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$, 大约是 Nd:YAG 的三倍 ($8.8 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$); 晶片截面尺寸为 3 mm \times 3 mm, 厚度为 1 mm, α 切割; 晶片的一面镀有 809 nm 高透、1064 nm 全反的介质膜, 另一面则对 1064 nm 增透。吸收谱测量结果呈现明显的偏振特性: 对于 π 偏振光, 主吸收峰处在 808.8 nm, 吸收系数约 30 cm^{-1} , 主吸收峰的半高宽度约 16 nm; 对于 σ 偏振光, 主吸收峰也处在 808.8 nm, 吸收系数则比 π 偏振小得多, 约为 20 cm^{-1} , 主吸收峰的半高宽度也比 π 偏振窄得多, 约为 5 nm。显然实验中应使泵浦光相对于 Nd:YVO₄ 晶片呈 π 偏振。

激光二极管的保护窗罩已被去掉, 以使 Nd:YVO₄ 晶片能够充分贴近激光二极管的发光面, 实现直接耦合泵浦 (DCP)^[4], 从而使结构更紧凑, 达到小型化、高效率。整个激光器的外型尺寸为 $\phi 40 \times 60$ mm。实验室内温度为 19 °C, 测得激光二极管的阈值驱动电流为 282 mA; 当驱动电流约为 954 mA 时, 输出激光中心波长为 809.2 nm, 线宽约为 2.8 nm (采用北京光学仪器厂生产的 WDG30 型光栅单色仪测量), 输出功率为 502 mW, 输出激光束的半角发散角约 $10^\circ \times 50^\circ$, 偏振态接近线偏振。由于 Nd:YVO₄ 晶片对 π 偏振光的主吸收峰带宽极宽, 即使环境温度波动导致激光二极管输出激光中心波长漂移, 泵浦光仍可被 Nd:YVO₄ 晶片有效吸收。因此, 实验中未对激光二极管进行主动控温, 而是将其固定在合适的热沉上, 使其在工作时能够良好散热。

镀在 Nd:YVO₄ 晶片上的 1064 nm 全反介质膜直接作为腔反射镜, 与一个曲率半径约 20 mm 的凹面镜 (输出耦合镜) 组成腔长约为 18 mm 的稳定平凹腔; 估算得腔内基横模腰斑直径约为 50 μm 左右。输出耦合镜在 1064 nm 处的透射率为 3.5%。

调 Q 实验中谐振腔内靠近输出耦合镜处置有一片两面已对 1064 nm 增透的 Cr³⁺:YAG 晶片, 作为饱和吸收型被动 Q 开关。Cr³⁺:YAG 晶体属于立方晶系, $O_h^0 (Ia3d)$ 空间群; 室温下的荧光寿命约 3.4~4.5 μs 。Cr³⁺:YAG 晶体在 900~1100 nm 处有一个吸收带, 是由 $^3A_2 \rightarrow ^3T_2$ 能级间跃迁形成的; 其吸收类似于色心晶体, 呈现出可饱和特性; 1064 nm 处的吸收截面典型值为 $57 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$, 大约是 Nd:YVO₄ 晶体受激发射截面的两倍多一点。再加之 Cr³⁺:YAG 晶体的物化特性较有机染料 (如 BDN 等) 及色心晶体 (如 Li:F₂ 等) 更为稳定, 所以特别适合于作为掺

Nd³⁺ 的激光介质(如 Nd:YAG 等)的饱和吸收型被动 Q 开关^[1,2]。实验中所使用的 Cr⁴⁺:YAG 晶片,直径约为 8 mm,厚度为 4 mm,1064 nm 波长的小信号吸收系数约为 0.37 cm⁻¹(厚度为 4 mm 的晶片在 1064 nm 处的透射率约 86.2%),是西南技术物理研究所生长并加工。

激光器的输出经过一个滤光片滤去残余的 809 nm 的泵浦光后,用激光功率计(Newport 公司的 1815-C 型,已对波长校准)测量 1064 nm 激光的输出功率(或平均功率)。

3 实验结果

3.1 连续激光运转

在图 1 所示的装置中,腔内未加入 Cr⁴⁺:YAG 晶片前进行了连续激光实验。在不同的驱动电流下,分别测量了 1064 nm 连续激光输出功率;将驱动电流对应为激光二极管的输出功率(即泵浦功率),则得到 1064 nm 连续激光输出功率与泵浦功率的关系,结果如图 2 所示。

图中的实线是用最小二乘法直线拟合得到的,泵浦阈值约为 22 mW。实验中,即使激光二极管工作在 954 mA 的驱动电流下(809.2 nm 输出功率约为 502 mW),1064 nm 输出激光束的远场光强横向分布仍呈高斯分布(基横模),功率约为 171.8 mW,相应的斜效率为 35.8%,光光总体转换效率为 34.2%。

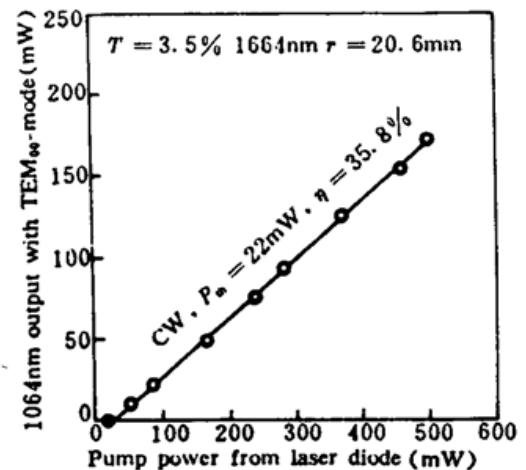


Fig. 2 Output power of the CW 1064 nm Nd:YVO₄ laser versus the pump power of the laser diode

3.2 连续泵浦高重复率被动调Q激光运转

实验中,在 Nd:YVO₄ 激光谐振腔内采用 Cr⁴⁺:YAG 晶片作为饱和吸收体,实现了激光二极管连续泵浦 Nd:YVO₄ 高重复率被动调 Q 激光运转。被动调 Q 运转的泵浦阈值约为 236 mW。当激光二极管驱动电流为 950 mA 时,泵浦功率约为 500 mW,测得激光器输出的 1064 nm 调 Q 激光脉冲序列的平均功率约为 16 mW。经中性衰减片衰减,1064 nm 干涉滤光片再次滤光后,采用上升时间约为 3 ns 的反向偏置光电二极管(西南技术物理研究所生产的 SPD-901 型 PIN 硅光电二极管)探测脉冲波形及脉冲重复率。

示波器上得到的 1064 nm 调 Q 激光脉冲的典型波形见图 3,脉冲前沿较后沿陡一些,半高宽度约为 114 ns。得到的调 Q 激光脉冲的典型序列见图 4,脉冲重复率高达 380 kHz。图 4 中的第一、二个脉冲间的时间间隔约为 2.63 μs,对应频率为 380.2 kHz;第二、三个脉冲间的时间间隔约为 2.60 μs,对应于 384.6 kHz;第三、四个脉冲之间的时间间隔约为 2.80 μs,对应于 357.1 kHz。由此可以大致估算出图 4 中 10 μs 内脉冲重复率的稳定性优于 5%。用示波器在较长时间内(30 min)监视脉冲强度的相对起伏以及脉冲时间的相对时间延迟,估算得脉冲幅度的稳定度约 12%,脉冲重复率的稳定度约 8%。文献[5]则使用 Li:F₂ 色心晶体作为激光二极管泵浦的小型 Nd:YAG 激光器的饱和吸收被动 Q 开关,其脉冲幅度的稳定度约为 10%,脉冲重复率的稳定度约为 15%,与我们得到的结果基本相当。

关于实验结果的较详细一些的分析正在进行之中,将另文介绍。

致谢 在实验和本文的写作过程中,作者曾与本所脉冲激光稳频小组的黄茂全教授及半导体激光强度噪声压缩小组的张天才副教授作了有益的讨论,谨在此表示感谢。

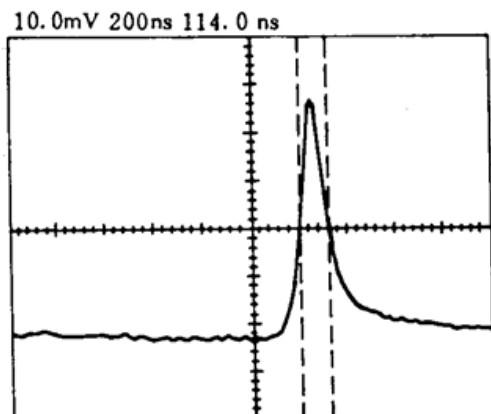


Fig. 3 Oscilloscope trace of a typical laser pulse from the passively Q -switched 1064 nm Nd:YVO₄ laser with a 500 mW pump power. The horizontal scale is 200 ns/div. The two dashed lines mark the pulse width of 114 ns

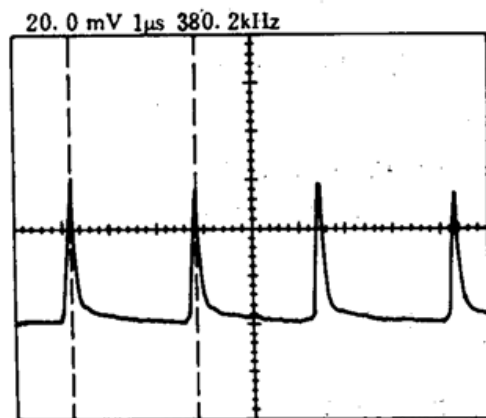


Fig. 4 A typical sequence of laser pulses from the passively Q -switched 1064 nm Nd:YVO₄ laser with 500 mW of pump power. The horizontal scale is 1 μs/div. The two vertical dashed lines mark the pulse period of 2.63 μs which corresponds to a pulse repetition rate of 380.23 kHz

参 考 文 献

- 1 J. J. Zayhowski, L. Dill III. Diode-pumped passively Q -switched picosecond microchip lasers. *Opt. Lett.*, 1994, 19(18):1427~1429
- 2 Jean-Jacques Aubert. Q -switched microchip lasers bring new applications to light. *Laser Focus World*, 1995, 31(6):S11~S13
- 3 Shiqun Li, Shouhuan Zhou, Pei Wang *et al.*. Self- Q -switched diode-pumped Cr, Nd:YAG laser with polarized output. *Opt. Lett.*, 1993, 18(3):203~204
- 4 N. MacKinnon, B. D. Sinclair. A laser diode array pumped, Nd:YVO₄/KTP, composite material microchip laser. *Opt. Commun.*, 1994, 105(3/4):183~187
- 5 Jeffrey A. Morris, Clifford R. Pollock. Passive Q -switching of a diode-pumped Nd:YAG laser with a saturable absorber. *Opt. Lett.*, 1990, 15(8):440~442

CW Output and High Repetitive Passive Q -switching of a Nd:YVO₄ Laser Coupled Directly by a Laser Diode

Wang Junmin Li Ruining Yang Weidong Xie Changde Xu Tianhua

(Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan 030006)

Abstract A laser diode directly coupled CW Nd:YVO₄ laser is reported. The pump threshold of about 22 mW and the maximum output of about 172 mW in TEM₀₀-mode are obtained with a slope efficiency of 35.8 percent. By using a Cr⁴⁺:YAG chip in the laser cavity as a saturable absorber, a laser diode continuously pumped Nd:YVO₄ laser is passively Q -switched for the first time. Laser pulses of 114 ns duration are produced with a repetition rate of as much as 380 kHz.

Key words laser diode pumped Nd:YVO₄, direct coupled pump (DCP), Cr⁴⁺:YAG crystal, passive Q -switching