

半导体激光泵浦 Nd·YVO₄ 激光器的 1.34 μm 输出特性*

王长青 沈德元 卢建仁 邵宗书 蒋民华
(山东大学晶体材料研究所, 济南 250100)

摘 要 报道了半导体激光泵浦 Nd·YVO₄ 激光器在 1.34 μm 的输出特性, 当入射的泵浦光功率为 515 mW 时, 最大 1.34 μm 激光输出功率达 157 mW, 光-光转换效率为 30.5%; 研究了激光器的纵模特性及弛豫噪声与泵浦功率的关系; 发现不同的纵模具有各自不同的弛豫振荡频率。

关键词 半导体激光泵浦, Nd·YVO₄, 1.34 μm 激光器, 纵模, 噪声。

1 引 言

1.3 μm 波段激光器在光纤通讯等领域有广泛的用途。Nd³⁺ 从 $F_{3/2}$ 能级到 $I_{13/2}$ 能级的受激跃迁可产生 1.3 μm 波段的激光辐射。在 1.3 μm 波段, Nd·YVO₄ 的受激发射截面远高于 Nd·YAG, $\sigma\tau$ 乘积也比 Nd·YAG 大得多, 其 1.34 μm 谱线与 1.06 μm 谱线的分支比为 0.24, 而 Nd·YAG 的分支比仅为 0.18^[1], 加上 Nd·YVO₄ 掺杂浓度高, 吸收系数大, 因此, 对于 1.3 μm 波段的半导体激光泵浦固体激光器, Nd·YVO₄ 是一种非常有效的激光晶体。1994 年, Bowkett 等首次实现了半导体激光泵浦 Nd·YVO₄ 微片激光器的 1.34 μm 激光运转^[2], 在 800 mW 泵浦功率下, 获得了 91 mW 的 1.34 μm 激光输出, 光-光转换效率为 11.4%。目前国内在半导体激光泵浦 Nd·YVO₄ 激光器方面的研究集中在 1.06 μm 及其倍频波段, 尚未见到有关半导体激光泵浦 1.34 μm Nd·YVO₄ 激光器的报道。

本文对半导体激光泵浦 Nd·YVO₄ 激光器的 1.34 μm 输出特性进行了仔细研究, 当入射到激光晶体表面的泵浦光功率为 515 mW 时, 1.34 μm 激光输出功率达 157 mW, 光-光转换效率为 30.5%, 测量并分析了激光器的纵模特性及弛豫噪声与泵浦功率的关系。

2 实验装置

1.34 μm Nd·YVO₄ 激光器采用半导体激光端面泵浦方式, 其装置如图 1 所示。泵浦光源是中国科学院半导体研究所生产的激光二极管, 其发光元面积为 $1 \times 100 \mu\text{m}^2$, 中心波长为 809 nm, 根据 GaAlAs 异质结的波导特性, 该半导体激光的输出为线偏振的 TE 模。实验所

* 中国博士后科学基金资助项目。

收稿日期: 1996 年 6 月 13 日; 收到修改稿日期: 1996 年 10 月 29 日

用半导体激光的最大输出功率为 1 W, 外加温控仪对其发射波长进行控制, 使其对准激光晶体的吸收峰。用直径为 2 mm、对 830 nm 波长的节距为 0.25 的自聚焦棒进行端面泵浦耦合。Nd·YVO₄ 晶体的掺钕浓度为 2 at%, 横截面 3.0 mm × 3.0 mm, a 轴通光, 通光方向长度 1.2 mm。在 809 nm 处, 晶体对 π 偏振泵浦光的吸收系数为 21.0 cm^{-1} , 对 σ 偏振泵浦光的吸收系数 10.4 cm^{-1} 。为抑制 Nd·YVO₄ 中增益最强的 $1.06 \mu\text{m}$ 谱线起振, 作为腔镜之一的 Nd·YVO₄ 晶体的泵浦光输入面的镀膜层除满足对 $1.34 \mu\text{m}$ 全反 ($R \geq 99.5\%$) 和 809 nm 高透 ($T \geq 90\%$) 外, 还要同时对 $1.06 \mu\text{m}$ 高透 ($T > 90\%$), 晶体的另一面镀 $1.34 \mu\text{m}$ 增透膜, 以减小腔内反射损耗。输出镜的曲率半径 $R = 20 \text{ mm}$, 对 $1.34 \mu\text{m}$ 激光的输出透过率 $T = 2.5\%$, 对 $1.06 \mu\text{m}$ 光的透过率大于 90%。

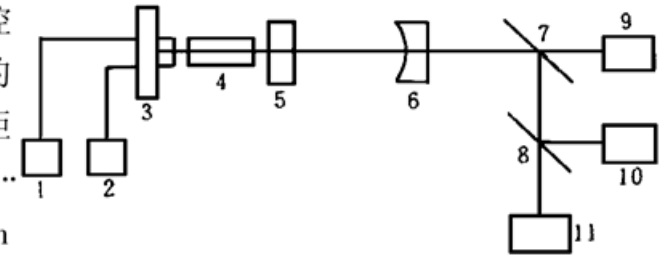


Fig. 1 Experimental setup for LD-pumped $1.34 \mu\text{m}$ Nd·YVO₄ laser

1-Driving power, 2-Temperature controller, 3-LD, 4-Gradient index lens, 5-Nd·YVO₄, 6-Output mirror, 7, 8-Beam splitter, 9-Power meter, 10-Monochromator, 11-Spectrum analyzer

3 实验结果与讨论

图 2 是腔长为 17 mm 时, $1.34 \mu\text{m}$ 激光的输入-输出特性曲线, 有关数据列于表 1 中。在 π 偏振泵浦情况下, 阈值泵浦功率仅为 16.8 mW, 比文献[2]报道的阈值要低得多, 当入射到激光晶体表面的泵浦功率为 515 mW 时, 获得了 157 mW 的 $1.34 \mu\text{m}$ 激光输出, 对应的光-光转换效率达 30.5%, 输出功率和光-光转换效率均比文献[2]的结果高。对于半导体激光泵浦的 $1.34 \mu\text{m}$ Nd·YVO₄ 激光器, 至今尚未发现比这更好的结果报道。当泵浦光为 σ 偏振时, 阈值泵浦功率为 27.6 mW, $1.34 \mu\text{m}$ 最大输出功率为 108.4 mW, 对应的光-光转换效率为 21.0%。

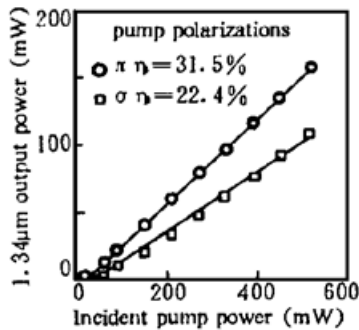


Fig. 2 Output power as a function of incident pump power

Table 1. Characteristics of $1.34 \mu\text{m}$ Nd·YVO₄ laser under different pump polarization (Calculated with pump power incident to the laser crystal)

pump polarization	pump threshold (mW)	Max. output power (mW)	slope efficiency (%)
π	16.8	157.0	31.5
σ	27.6	108.4	22.4

从图 2 和表 1 可以发现, 对于不同偏振的泵浦光, 同一泵浦功率所对应的激光输出功率和效率有很大差别, 但这里的泵浦功率是指入射到激光晶体表面的泵浦功率, 前面已经提到, Nd·YVO₄ 对 π 偏振泵浦光的吸收系数约为 σ 偏振光的 2 倍, 这也就意味着, 当泵浦光为 σ 偏振时, 未被晶体吸收而透过晶体的泵浦光较多。测量并扣除透过晶体的泵浦光成分, 以晶体实际吸收的泵浦光功率计算, 将所得激光器的输出特性列于表 2。从表 2 可见, 对于 π 和 σ 两种不同的偏振泵浦方式, 仍是 π 偏振泵浦时的阈值低、斜效率高, 但 π 偏振和 σ 偏振泵浦的

斜效率之差已不像表 1 所列数据那样显著。从以上分析可以得知, 对于 $1.34 \mu\text{m}$ 运转的 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 激光器, π 偏振泵浦方式明显优于 σ 偏振泵浦。

Table 2. Characteristics of $1.34 \mu\text{m}$ $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ laser under different pump polarization (Calculated with pump power absorbed by the laser crystal)

pump polarization	pump threshold (mW)	Max. output power (mW)	slope efficiency (%)
π	14.1	157.0	33.1
σ	21.6	108.4	31.0

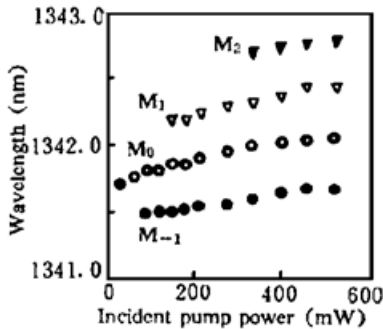


Fig. 3 Variation of the output laser wavelength of the central peak with incident pump power

用分辨率为 0.1 nm 的光谱分析仪研究了 π 偏振泵浦时激光器的输出纵模及峰值波长随泵浦功率的变化关系, 如图 3 所示。当泵浦功率小于 90 mW 时, 由于激光晶体对泵浦光的短程吸收作用^[3], 激光器单纵模运转 (M_0 模)。随着泵浦功率增加, 有效泵浦区域加长, 增益介质的空间烧孔效应导致另外三个纵模 (M_{-1} 、 M_1 、 M_2) 相继获得足够的增益而起振, 激光器变成多纵模运转。另外, 随着泵浦功率增加, 激光晶体的温度不断升高, 其光谱结构发生变化; 且晶体温度的改变也导致晶体的长度和折射率发生变化, 从而改变谐振腔的光学腔长。因此, 激光器的输出波长随泵浦功率的增加而发生改变。

从图 3 可算得 M_0 模的平均变化率为 $7.68 \times 10^{-4} \text{ nm/mW}$ 。

用快速光二极管探测器和 HP3585A 型频谱分析仪对激光输出的幅度噪声谱进行了分析。因为激光器的弛豫振荡噪声是引起固体激光器输出涨落的主要机制, 实验拍摄了弛豫振荡尖峰结构与泵浦功率的关系, 如图 4 所示。图 4 中的 (a)、(b)、(c)、(d) 对应的泵浦功率分别为

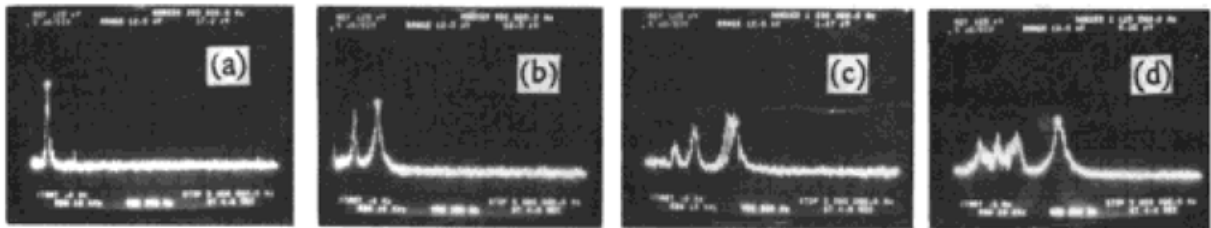


Fig. 4 Amplitude-noise power spectrum under different incident pump power (a) 50 mW , (b) 120 mW , (c) 250 mW , (d) 500 mW)

50 mW 、 120 mW 、 250 mW 和 500 mW 。从图 3 可知, 在上述四种泵浦功率下, 激光器输出的纵模个数分别为 1 个、2 个、3 个和 4 个, 图 3 与图 4 对比, 发现激光输出的纵模个数与弛豫振荡频谱的尖峰个数相同。因此作者认为, 激光器输出的每个纵模具有各自不同的弛豫振荡频率。这可能是因为激光器的弛豫振荡频率与腔内功率密度成正比^[4], 不同纵模由于其增益不同, 腔内功率密度不同, 因而弛豫振荡频率不同, 频率最高的应当对应于最靠近谱线中心的、即增益最强的 M_0 模。经测量, M_0 模对应的弛豫振荡频率随泵浦功率的变化关系如图 5 所示。图中 “ \circ ” 为实验测量值, 根据实验数据拟合得

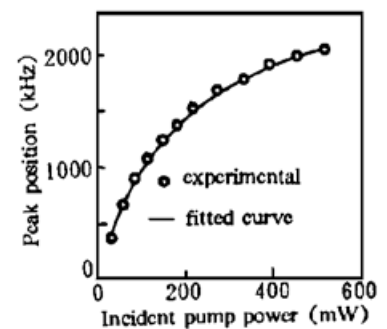


Fig. 5 Variation of the relaxation oscillation frequency with incident pump power

到的曲线满足关系式:

$$\omega = 2801.77 P^{1/6} - 3970.79$$

其中, ω 的单位为 “kHz”, 泵浦功率 P 的单位为 “mW”。

结 论 利用半导体激光纵向泵浦 Nd·YVO₄ 晶体, 并通过晶体和腔镜的镀膜抑制增益较强的 1.06 μm 谱线起振, 实现了 1.34 μm 激光运转。当入射到激光晶体表面的偏振泵浦光功率为 515 mW 时, 获得了 157 mW 的 1.34 μm 激光输出, 对应的光-光转换效率达 30.5%, 对于半导体激光泵浦的 1.34 μm Nd·YVO₄ 激光器, 作者尚未发现比这更好的结果报道。此外, 对激光器的输出纵模及弛豫噪声与泵浦功率的关系进行了测量和分析研究, 并发现不同的纵模具有各自不同的弛豫振荡频率。

参 考 文 献

- [1] B. H. T. Chai, G. Loutts, J. Lefaucheur *et al.*, Comparison of laser performance of Nd-doped YVO₄, GdVO₄, Ca₅(PO₄)₃F, Sr₅(PO₄)₃F and Sr₅(VO₄)₃F. *Proc. Advanced Solid-State Lasers*, 1994, **20**(5): 41~44
- [2] G. C. Bowkett, G. W. Baxter, D. J. Booth, Single-mode 1.34-μm Nd·YVO₄ microchip laser with cw Ti:sapphire and diode-laser pumping. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(13): 957~959
- [3] G. J. Kintz, T. Baer, Single-frequency operation in solid-state materials with short absorption depths. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1990, **QE-26**(9): 1457~1459
- [4] W. 克希奈尔, 固体激光工程. 第一版. 北京, 科学技术出版社, 1983: 104~105

Characteristics of LD-Pumped Nd·YVO₄ Laser Operating at 1.34 μm

Wang Changqing Shen Deyuan Lu Jianren

Shao Zongshu Jiang Minhua

(Institute of Crystal Materials, Shandong University, Jinan 250100)

(Received 13 June 1996; revised 29 October 1996)

Abstract The characteristics of a LD-pumped Nd·YVO₄ laser operating at 1.34 μm are reported. The maximum output power of 157 mW with a optical-to-optical conversion efficiency of 30.5% has been obtained at the incident pump power of 515 mW. Variations of the longitudinal modes and the amplitude-noise power spectrum with the incident pump power have been studied. The phenomenon that each longitudinal mode has its own relaxation oscillation frequency has been found.

Key words LD-pumped, Nd·YVO₄, 1.34 μm laser, longitudinal mode, amplitude-noise.