

钛宝石激光泵浦的 $1.06 \mu\text{m}$ 和 $1.34 \mu\text{m}$ 高效连续掺钕氟钒酸锶激光器*

王长青 Y. T. Chow

孟宪林 邵宗书

(香港城市大学电子工程系 香港九龙达之路) (山东大学晶体材料国家重点实验室 济南 250100)

提要 利用钛宝石激光作为泵浦源, 实现了掺钕氟钒酸锶($\text{Nd} \cdot \text{SVAP}$) 晶体在 $1.06 \mu\text{m}$ 和 $1.34 \mu\text{m}$ 的高效连续激光运转。在 $1.06 \mu\text{m}$ 和 $1.34 \mu\text{m}$ 处得到的最低泵浦阈值分别为 2 mW 和 2.4 mW , 最高斜效率分别为 49.4% 和 37.4% , 最大输出功率分别为 336 mW 和 165 mW 。

关键词 高效率, $\text{Nd} \cdot \text{SVAP}$ 激光器, 钛宝石激光器

1 引 言

掺钕氟钒酸锶($\text{Nd} \cdot \text{Sr}_5(\text{VO}_4)_3\text{F}$, 简称 $\text{Nd} \cdot \text{SVAP}$) 作为近年来出现的一种新型激光晶体已越来越引起人们的重视, 半导体激光和染料激光泵浦的 $1.06 \mu\text{m}$ 及其腔内倍频的 $\text{Nd} \cdot \text{SVAP}$ 激光器已有一些报道^[1~3]。本文报道钛宝石激光泵浦的 $\text{Nd} \cdot \text{SVAP}$ 激光器在 $1.06 \mu\text{m}$ 和 $1.34 \mu\text{m}$ 的运转特性。与半导体激光相比, 钛宝石激光不仅线宽窄, 波长不随温度漂移, 可以准确地对准 $\text{Nd} \cdot \text{SVAP}$ 的吸收峰中心, 而且光束质量好, 聚焦后在晶体内容易实现泵浦体积与激光振荡基模的匹配; 与染料激光相比, 钛宝石激光的波长更接近 $\text{Nd} \cdot \text{SVAP}$ 的辐射波长, 量子效率高, 有利于减小晶体的热效应。因此用钛宝石激光作为泵浦源可以获得更低的泵浦阈值和更高的转换效率。特别值得注意的是, $\text{Nd} \cdot \text{SVAP}$ 辐射谱的 $1.34 \mu\text{m}$ 谱线与 $1.06 \mu\text{m}$ 谱线的分支比高达 0.42 , 而 $\text{Nd} \cdot \text{YAG}$ 和 $\text{Nd} \cdot \text{YVO}_4$ 的分支比仅为 0.18 和 0.24 ^[4], 因此, $\text{Nd} \cdot \text{SVAP}$ 在 $1.34 \mu\text{m}$ 波段是一种非常有效的激光晶体。关于相干泵浦连续运转的 $1.34 \mu\text{m}$ $\text{Nd} \cdot \text{SVAP}$ 激光器我们目前尚未见到其他文献的报道。

2 实验和结果

2.1 实验装置

$\text{Nd} \cdot \text{SVAP}$ 晶体属六方晶系。本实验所用的 $\text{Nd} \cdot \text{SVAP}$ 晶体是用 Czochralski 方法生长的, 掺钕浓度为 $2 \text{ at. } \%$, 经测试, 其吸收峰值波长在 809.6 nm , 对 π 偏振和 σ 偏振光的吸收系数分别为 10.71 cm^{-1} 和 6.16 cm^{-1} 。将晶体按 $X(a)$ 方向切割后加工成通光长度为 1.5 mm 的

* 香港城市大学光电子研究中心资助。

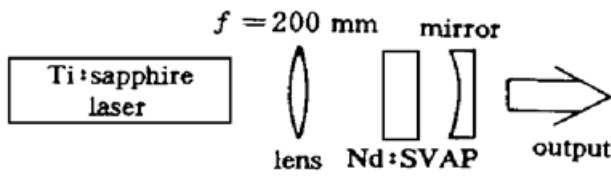


图 1 钛宝石激光泵浦的 Nd·SVAP 激光器
实验示意图

Fig. 1 Experimental setup of the Ti·sapphire
laser pumped Nd·SVAP laser

样品, 并使其 c 轴包含在通光表面内, 然后将其分割成两块, 分别按 $1.06 \mu\text{m}$ 和 $1.34 \mu\text{m}$ 激光器的要求镀膜。实验所用的泵浦源为 Coherent 890 型钛宝石激光器, 将其输出波长调至 809.6 nm , 其线宽小于 0.1 nm , 采用纵向泵浦方式, 用一个 200 mm 焦距的单透镜将泵浦光聚焦在晶体内部。为获得高泵浦效率, 使泵浦光的偏振方向平行于晶体 c 轴 (π 偏振泵浦)。实验装置如图 1 所示。

2.2 1.06 μm 激光运转

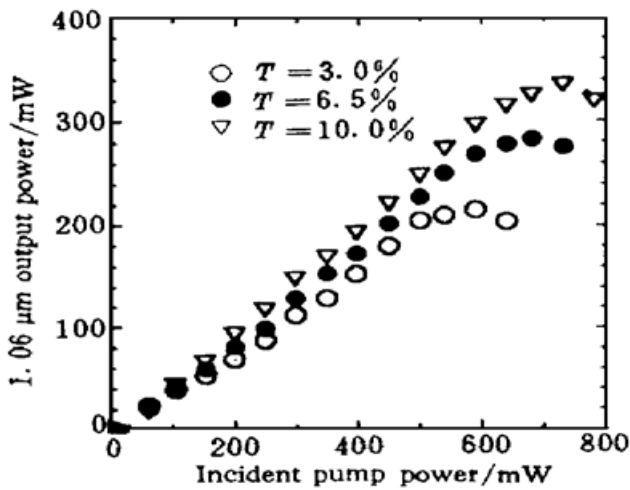
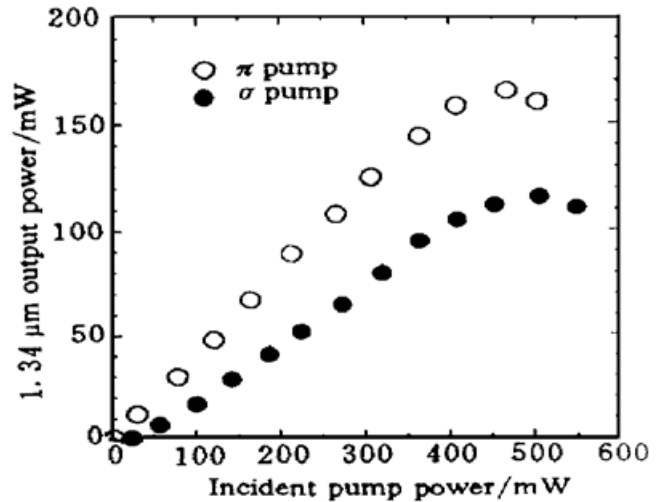
对于 $1.06 \mu\text{m}$ 激光运转, Nd·SVAP 晶体的一面要镀 $1.06 \mu\text{m}$ 全反 ($R > 99.8\%$) 和 809.6 nm 高透 ($T > 90\%$) 膜, 该面作为激光谐振腔的一个腔镜, 另一面镀 $1.06 \mu\text{m}$ 增透膜, 以减小腔内反射损耗。采用平凹腔结构, 输出镜曲率半径为 20 mm , 对 $1.06 \mu\text{m}$ 的透过率有 3.0% , 6.5% , 10.0% 3 种。对于每种透过率的输出镜, 均将激光腔调整到最佳输出状态, 测得激光器的输入-输出特性曲线如图 2 所示。3 种透过率所对应的激光器的泵浦阈值、斜效率和最大输出功率列于表 1, 其中斜效率是输入-输出曲线的线性增加部分的斜率。当透过率为 3.0% 时, 阈值泵浦功率为 2 mW , 斜效率为 39.0% , 最大输出功率为 215 mW , 优于我们过去报道的在相同腔参数下用半导体激光作为泵浦源的实验结果^[2]。这主要得益于钛宝石激光的高光束质量, 聚焦后在晶体内部能够得到又小又圆的泵浦光斑, 使得泵浦功率密度较高, 而且容易实现与腔模振荡体积的模式匹配, 另外, 钛宝石激光的窄线宽也使得全部泵浦能量都集中在激光晶体的峰值吸收波长, 大大提高了泵浦效率。在透过率为 10.0% 的情况下, 当入射泵浦功率为 730 mW 时, 获得最大 $1.06 \mu\text{m}$ 输出功率为 336 mW , 斜效率为 49.4% 。从图 2 可看出, 在现有的 3 种透过率中, 10.0% 的输出镜对应于最大激光斜效率, 如果使用更大透过率的输出镜, 激光器的输出功率和斜效率有可能进一步增加。

表 1 钛宝石激光泵浦的 $1.06 \mu\text{m}$ 和 $1.34 \mu\text{m}$ Nd·SVAP 激光特性

Table 1 Characteristics of $1.06 \mu\text{m}$ and $1.34 \mu\text{m}$ Nd·SVAP laser pumped by a Ti·sapphire laser

	$1.06 \mu\text{m}$ (π pump)			$1.34 \mu\text{m}$ ($T = 2.5\%$)	
	$T = 3.0\%$	$T = 6.5\%$	$T = 10.0\%$	π pump	σ pump
threshold/mW	2	10	15	2.4	25
slope efficiency/%	39.0	45.0	49.4	37.4	26.1
max. output/mW	215	283	336	165	116

由于 Nd·SVAP 晶体的热导性较差, 晶体的热效应对激光器的运转特性有很大影响。从图 2 可以看出, 当泵浦功率增加到一定程度时, 斜效率会降低, 进一步增加泵浦功率还会导致输出功率下降。不同透过率的输出镜所对应的使输出功率开始下降的泵浦功率也不同, 对于透过率较大的输出镜, 一定的泵浦功率由于转换成激光输出的部分相对较多, 而转换成晶体温升的部分相对较少, 所以在比较高的泵浦功率下晶体的热效应才使输出功率下降; 而对于透过率较低的输出镜情况则正好相反, 在较低的泵浦功率下晶体的热效应就已明显导致输出功率下降。对于 $T = 3.0\%$, 6.5% 和 10.0% 的 3 种输出镜, 在泵浦功率分别大于 590 , 680 和 730 mW 时, 晶体的热效应将会引起输出功率下降。

图2 1.06 μm 输出功率随泵浦功率的变化Fig. 2 1.06 μm output power as a function of incident pump power图3 1.34 μm 输出功率随泵浦功率的变化Fig. 3 1.34 μm output power as a function of incident pump power

2.3 1.34 μm 激光运转

对于 1.34 μm 的激光运转, Nd·SVAP 晶体的一面要镀 1.34 μm 全反 ($R > 99.8\%$) 和 809.6 nm 高透 ($T > 90\%$) 膜, 为抑制增益较强的 1.06 μm 激光起振, 该面还要同时镀 1.06 μm 高透膜 ($T > 90\%$), 该面也将作为激光谐振腔的一个腔镜, 另一面镀 1.34 μm 增透膜, 以减小腔内反射损耗。仍采用平凹腔结构, 输出镜曲率半径为 20 mm, 对 1.34 μm 的透过率为 2.5%, 同时对 1.06 μm 光的透过率也大于 90%。在 π 和 σ 两种偏振泵浦情况下, 分别测量了激光器的输入-输出特性曲线, 如图 3 所示。两种偏振泵浦所对应的泵浦阈值、斜效率和最大输出功率也列在表 1 中。在 π 偏振泵浦时, 阈值仅为 2.4 mW, 斜效率为 37.4%, 当泵浦功率为 507 mW 时, 输出功率为 165 mW, 与文献[5]和[6]报道的 Nd·YAG 和 Nd·YVO₄ 在 1.3 μm 处的实验结果相比, Nd·SVAP 的确是一种适合 1.3 μm 运转的低阈值高效率激光晶体, 这主要是由 Nd·SVAP 在 1.34 μm 辐射的高分支比决定的。

从图 3 可以看出, 随着泵浦功率的增加, π 偏振泵浦比 σ 偏振泵浦较早地显示出了热效应的影响, 这是由于晶体对 π 偏振光的吸收系数较大造成的。此外, 将图 3 与图 2 相比还可看出, 随着泵浦功率的增加, 1.34 μm 运转比 1.06 μm 运转更早地显示出了热效应的影响, 这是因为在相同泵浦功率下, 1.34 μm 输出功率低于 1.06 μm 输出功率, 因此转换成晶体温升的泵浦功率多于 1.06 μm 运转的情况, 所以热效应的影响比 1.06 μm 运转出现得早。

实验中将晶体固定在一块铜制热沉上, 可以通过改善晶体与铜块之间的热接触来尽量减小热效应的影响, 因此对晶体控温效果肯定会更好。

对于 1.06 μm 和 1.34 μm 两种运转情况, 通过远场观察发现激光输出是 TEM₀₀ 模。利用 HP-70951A 型光谱分析仪对激光器的输出波长进行了精确测量, 得到激光波长的精确值分别为 1.065 μm 和 1.338 μm 。

参 考 文 献

- 1 Wang Changqing, Shen Deyuan, Meng Xianlin *et al.*. A diode-pumped low threshold Nd·SVAP/KTP laser. *Chinese J. of Lasers*, 1995, **24**(5): 393-396

- 2 Shen Deyuan, Wang Changqing, Shao Zongshu *et al.*. Laser performance of LD pumped Nd·Sr₅(VO₄)₃F crystal. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1997, **17**(1): 41~ 44 (in Chinese)
- 3 Qingpu Wang, Shengzhi Zhao, Xingyu Zhang. Laser characteristics of low-threshold high-efficiency Nd·Sr₅(VO₄)₃F crystal. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(11): 1262~ 1264
- 4 B. H. T. Chai, G. Loutts, J. Lefebvre *et al.*. Comparison of laser performance of Nd-doped YVO₄, GdVO₄, Ca₅(PO₄)₃F, Sr₅(PO₄)₃F and Sr₅(VO₄)₃F. *Proceedings on Advanced Solid-state Lasers*, 1994, **20**: 41~ 52
- 5 G. C. Bowkett, G. W. Baxter, D. J. Booth. Single-mode 1.34- μ m Nd·YVO₄ microchip laser with cw Ti·sapphire and diode-laser pumping. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(13): 957~ 959
- 6 G. J. Hall, A. I. Ferguson. Generation of single-frequency radiation at 1064, 1319, and 659.5 nm with an all-solid-state, out-of-plane Nd·YAG ring laser. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(8): 557~ 559

High Efficient CW Nd·SVAP Laser Operation at 1.06 μ m and 1.34 μ m Pumped by a Ti·sapphire Laser

Wang Changqing Y. T. Chow

(Department of Electronic Engineering, City University of Hong Kong)

Meng Xianlin Shao Zongshu

(National Key Laboratory of Crystal Materials, Shandong University, Jinan 250100)

Abstract High efficient CW Nd·SVAP laser operations at 1.06 μ m and 1.34 μ m are realized with a Ti·sapphire laser as the pump source. The threshold, slope efficiency, and maximum output power are 2 mW, 49.4%, and 336 mW at 1.06 μ m, and 2.4 mW, 37.4%, and 165 mW at 1.34 μ m respectively.

Key words high efficiency, Nd·SVAP laser, Ti·sapphire laser