

激光二极管泵浦 Nd : Sr₅(VO₄)₃F 激光器的输出特性研究*

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

摘 要 分析了 Nd : SVAP 晶体在 $X(a)$ -轴和 Y -轴不同切割情况下的偏振吸收和荧光谱, 并对沿不同方向切割样品的激光特性进行了研究。发现沿 X 轴方向切割样品的荧光谱的偏振度为 4.41, 而沿 Y 轴方向切割样品的偏振度为 2.18。并且, 沿 X 轴方向切割样品的 π 偏振荧光谱的强度是沿 Y 轴切割样品的 1.7 倍。还报道了对激光器输出中心波长与泵浦功率大小的关系以及输出功率的大小与激光晶体温度关系的研究结果。

关键词 激光二极管, 泵浦, 氟钒酸锶, 激光器。

1 引 言

掺钕氟钒酸锶[Nd : Sr₅(VO₄)₃F, 或 Nd : SVAP] 是 S. A. Payne 和 George Loutts 等人于 1993 年首次报道的适合激光二极管(LD) 泵浦的优良激光晶体材料^[1,2]。该晶体属于六方晶系的单轴晶体, 在 1.065 μm 的受激发射截面为 $5 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$, 上能级荧光寿命 230 μs , 是 Nd : YVO₄(90 μs) 的 2.6 倍, 并且在 809 nm 处的吸收带宽与 Nd : YVO₄ 相当^[1]。此外, Nd : SVAP 还有浓度猝灭效应小、泵浦阈值低等优点。由于它在 1.065 μm 的辐射线为高分支比的线偏振光, 是腔内倍频激光器的理想激光材料。Laura D. DeLoach 等 1994 年报道了用钛宝石激光器泵浦的 Nd : SVAP 激光特性^[3], 以晶体实际吸收的泵浦功率计算, 获得了 66% 的斜效率。但至今未见激光二极管直接泵浦 Nd : SVAP 激光器的报道。作者于 1994 年 10 月在国内率先研制成功 Nd : SVAP 单晶, 本文报道了对 Nd : SVAP 样品在沿不同方向切割情况下的偏振吸收和荧光谱以及激光特性的研究结果。

2 实验结果及分析

以 SrCO₃、SrF₂、V₂O₅ 和 Nd₂O₃ 作为起始原料, 经过配方筛选和原料处理工艺的优化, 合成出用于单晶生长的多晶备料之后, 采用 Czochraski 技术生长出单晶。这种单晶经过适当的后处理进行样品定向、加工和镀膜及有关的测试工作。考虑到该晶体属于六方晶系, 其 X 方向和 Y 方向的晶格结构和面网密度不同, 其光谱及激光特性可能会有差异。所以, 将晶体

* 国家自然科学基金委重点实验室基金资助项目。

收稿日期: 1995 年 8 月 3 日

分别沿 X 轴和 Y 轴两种不同方向切割, 然后抛光至 3.5 mm 进行光谱分析。

2.1 Nd:SVAP 的光谱特性

利用 Hitachi-340 型分光光度计对 Nd:SVAP 晶体在沿 X 轴(a 轴) 和 Y 轴不同切割情况下的偏振吸收光谱作了研究, 结果表明, 晶体的偏振吸收谱的峰形基本一致, 只是强度略有差异。图 1 给出了沿 X 轴切割的样品在 500~ 850 nm 范围内的偏振吸收谱。在 809.6 nm 处 π 偏振吸收峰的强度是 σ 偏振的 1.8 倍, 吸收峰的半宽度为 2.5~ 3 nm。

以氩离子激光器 514.5 nm 的线偏振光作为泵浦光源, 采用端面泵浦、平行方向接收的方式研究了 Nd:SVAP 不同偏振方向荧光发射谱。图 2 给出了沿 X 和 Y 轴不同方向切割两样品的室温偏振荧光谱。文献[1]报道, Nd:SVAP 的优点之一是发射峰窄而强, 且具有很高的偏振度 ($I_\pi : I_\sigma = 3.4$), 但未报道晶体的切割方向。从图 2 看出: Nd:SVAP 在 1.065 μm 的辐射为一单峰, 不象 Nd:YVO₄ 那样在主峰附近还有两个较弱的伴峰。对于 X 轴切割的样品, $I_\pi : I_\sigma = 4.41$; 对于 Y 轴切割的样品, $I_\pi : I_\sigma = 2.18$; (沿 a 轴切割的 Nd:YVO₄ 的偏振度 $I_\pi : I_\sigma = 1.2$)。从图中还可以看出, X 轴切割样品的 π 偏振荧光谱的强度是 Y 轴切割样品的 1.7 倍。综上所述, 沿 X 轴切割 Nd:SVAP 样品有两个主要优点: 1) 增益截面大, 可获得较高的效率; 2) 荧光谱的偏振度高, 更适合腔内倍频。

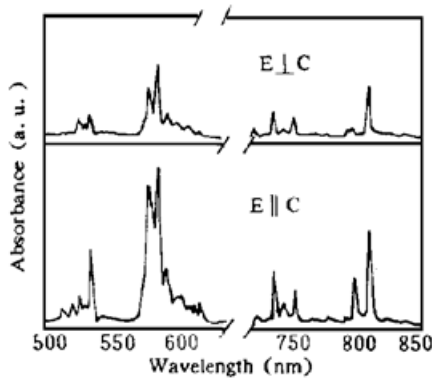


Fig. 1 Room temperature polarized absorption spectra of the $X(a)$ -axis cut Nd:SVAP

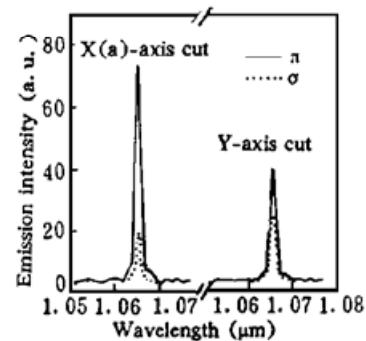


Fig. 2 Room temperature polarized emission spectra of the two Nd:SVAP samples, cut perpendicular to $X(a)$ -axis and Y -axis respectively, in the 1.06 μm region obtained by CW excitation of a argon laser

2.2 Nd:SVAP 的激光特性

低损耗端面泵浦激光器的阈值可表示为:

$$P_{th} = \frac{h\nu\delta}{2\sigma_e\tau\eta_p} \left[\frac{\pi}{2} (w_p^2 + w_0^2) \right]$$

其中, $h\nu$ 为泵浦光子能量, σ_e 为晶体的受激发射截面, τ 为晶体的上能级寿命, δ 为腔的损耗, η_p 为泵浦的量子效率, w_p 和 w_0 分别代表泵浦光和谐振腔基模半径。Nd:SVAP 的发射截面和荧光寿命积为 $11.5 \times 10^{-20} \text{ ms} \cdot \text{cm}^2$, 比 Nd:YVO₄ ($10 \times 10^{-20} \text{ ms} \cdot \text{cm}^2$) 略大。所以, 和 Nd:YVO₄ 一样, Nd:SVAP 也是一种低阈值的激光晶体。

激光实验中采用平凹腔, 输出镜曲率半径 $R = 102 \text{ mm}$, 输出耦合率 $T = 3\%$ 。沿 X 轴方向切割的样品截面为 $4.4 \times 3.9 \text{ mm}^2$, 通光方向长度为 2.6 mm; 沿 Y 轴方向切割的样品截面为 $3.6 \times 3.5 \text{ mm}^2$, 通光方向长度为 2.5 mm。晶体的一个表面镀有 1.06 μm 的高反膜作为一

个腔镜,另一表面镀有 $1.06\ \mu\text{m}$ 增透膜以减小腔内损耗。在 $809.6\ \text{nm}$ 处, X 轴方向切割的晶体对 π 偏振和 σ 偏振泵浦光的吸收系数分别为 $9.08\ \text{cm}^{-1}$ 和 $5.46\ \text{cm}^{-1}$, Y 轴方向切割的晶体对 π 偏振和 σ 偏振泵浦光的吸收系数分别为 $8.24\ \text{cm}^{-1}$ 和 $5.02\ \text{cm}^{-1}$ 。激光二极管发出的光经光学耦合系统聚焦到激光晶体上,光斑半径约为 $55\ \mu\text{m}$,光学系统的耦合效率为 65% 。激光晶体安装于半导体制冷片上以实现温控,监测晶体温度的温度计紧贴于晶体侧面。

实验时根据激光二极管的温度、波长和电流关系,利用温控系统选择好激光二极管的中心波长使其与 Nd:SVAP 晶体 $809.6\ \text{nm}$ 处的吸收峰达到最佳匹配。仔细调节耦合聚焦系统,调节时要根据激光晶体的厚度兼顾到焦斑的大小及聚焦长度两方面。然后根据泵浦光的光斑大小及所用输出耦合镜的曲率半径选择适当的腔长使激光器的束腰 w_0 与泵浦光束能很好地匹配,以求达到最佳的泵浦效率。经耦合聚焦系统后的泵浦光和 $1.06\ \mu\text{m}$ 激光的功率用经标定的 LP-3B 功率计测量。

图 3 为沿不同方向切割的样品在不同偏振泵浦状态下的输入-输出功率曲线。最好的结果是在 X 轴方向切割的样品上获得的,当入射在晶体表面的 π 偏振泵浦光为 $575\ \text{mW}$ 的时,激光器输出功率为 $193\ \text{mW}$,尚未出现明显的输出饱和现象,光-光转换效率为 34% 。在图 3 中, X 轴方向切割的样品在 π 和 σ 偏振泵浦情况下的斜率分别为 36.1% 和 27.7% ,阈值泵浦功率分别为 $6.8\ \text{mW}$ 和 $13.4\ \text{mW}$ 。沿 Y 轴方向切割的样品在 π 和 σ 偏振泵浦情况下的斜率分别为 30.3% 和 24.9% ,阈值泵浦功率分别为 $8.4\ \text{mW}$ 和 $11.5\ \text{mW}$ 。在同等实验条件下,沿 a 轴切割、 π 偏振泵浦 Nd:YVO₄ 的阈值泵浦功率为 $11.8\ \text{mW}$,大于 Nd:SVAP 的 $6.8\ \text{mW}$ 。

利用激光晶体的温控装置,研究了 Nd:SVAP(X 轴切割)激光器的输出功率与晶体温度之间的关系,并与 Nd:YVO₄ 进行了比较。图 4 是激光器输出功率与激光晶体温度的关系, Nd:SVAP 激光器输出功率的温度变化率为 $-0.42\ \text{mW}/^\circ\text{C}$,大于 Nd:YVO₄ 的 $-0.32\ \text{mW}/^\circ\text{C}$ 。而 Nd:SVAP 的热导率仅为 $1.7\ \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,比 Nd:YVO₄ 的 $5.1\ \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 小。所以,在 Nd:SVAP 激光器,激光晶体的散热问题比 Nd:YVO₄ 激光器更显得重要。

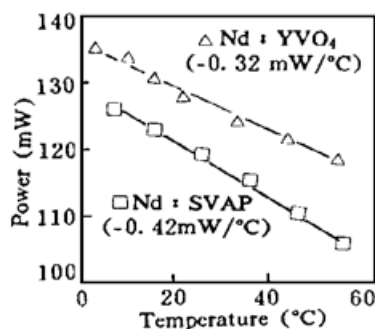


Fig. 4 Variation of the output power with the crystal temperature of the $X(a)$ -cut sample and Nd:YVO₄

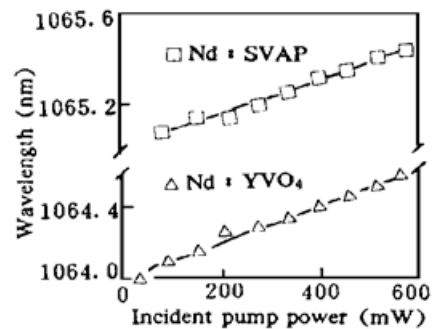


Fig. 5 Variation of the wavelength of the central peak with the incident pump power of the $X(a)$ -cut sample and Nd:YVO₄

图 5 给出了输出激光的中心波长与泵浦功率大小的关系。室温下 Nd:SVAP 激光器辐

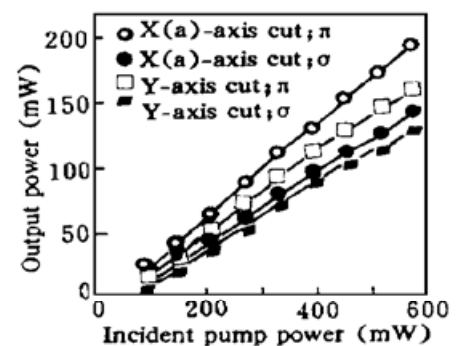


Fig. 3 Output power of the Nd:SVAP laser versus incident pump power with an output coupler of $T = 3\%$

射的中心波长为 $1.065 \mu\text{m}$, 随泵浦功率的增加, 激光晶体的温度随之升高, 从而导致了激光辐射波长的漂移。波长随泵浦功率的变化率 $d\lambda/dP = 6.9 \times 10^{-4} \text{ nm/mW}$, 略小于 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ ($10.0 \times 10^{-4} \text{ nm/mW}$)。考虑到 $\text{Nd}:\text{SVAP}$ 的热导率比 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 小, 在泵浦功率增加相同的值时, $\text{Nd}:\text{SVAP}$ 晶体温度的变化量比 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 大。所以, 可以认为, $\text{Nd}:\text{SVAP}$ 激光器输出波长随温度的变化比 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 激光器小。

结 论 研究了沿 X 轴(a 轴) 和 Y 轴不同方向切割的 $\text{Nd}:\text{SVAP}$ 样品的偏振吸收和荧光谱及激光特性。当晶体沿 X 轴方向切割时, 以 575 mW 的 π 偏振泵浦光入射, 激光器输出功率为 193 mW , 光-光转换效率为 34% 。激光器输出功率的温度变化率 $dP/dT = -0.42 \text{ mW}/^\circ\text{C}$, 激光输出波长随泵浦功率的变化率 $d\lambda/dP = 6.9 \times 10^{-4} \text{ nm/mW}$ 。

参 考 文 献

- [1] S. A. Payne, B. H. T. Chai, W. L. Kway *et al.*, New high cross section laser crystal: Neodymium-doped strontium fluorovanadate. *CLEO'93*, Baltimore, 1993, Postdeadline Paper CPD 12-1/24
- [2] George Loutts, Ping Hong, Bruce H. T. Chai, Comparison of neodymium laser hosts based on fluoro-apatite structure. *MRS Fall Meeting*, Boston, 1993, 12: paper R4.2
- [3] Laura D. Deloach, Stephen A. Payne, Bruce H. T. Chai *et al.*, Laser demonstration of neodymium-doped strontium chloro-vanadate. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, **65**(10): 1208~

Laser Performance of LD Pumped $\text{Nd}:\text{Sr}_5(\text{VO}_4)_3\text{F}$ Crystal

Shen Deyuan Wang Changqing Shao Zongshu

Meng Xianlin Jiang Minhua

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

(Received 3 August 1995)

Abstract Laser-quality single crystal of $\text{Nd}:\text{SVAP}$ was obtained by Czochralski method in our laboratory. Room temperature polarized absorption and emission spectra of the $X(a)$ -axis cut and Y -axis cut samples are analysed in this paper, and the laser characteristic of the two differently cut samples are studied.

Key words laser diode, pump, $\text{Nd}:\text{Sr}_5(\text{VO}_4)_3\text{F}$ (or $\text{Nd}:\text{SVAP}$), laser.