

879 nm 激光二极管抽运准三能级 Nd:GdVO₄ 激光器

高 静 于 欣 张 震 张文平 陈 飞 彭江波 李旭东 于俊华 王月珠

(哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 利用 879 nm 新型激光二极管(LD)抽运 Nd:GdVO₄ 晶体,在室温下实现了⁴F_{3/2}→⁴I_{9/2}准三能级激光谱线跃迁。对掺杂原子数分数 0.2%,3 mm×3 mm×3.8 mm 的晶棒,在抽运功率为 33 W 时,获得 912 nm 最大输出 2.5 W,斜率效率 11%,相应的对吸收抽运功率的斜率效率达 38%;对掺杂原子数分数 0.2%,3 mm×3 mm×5 mm 的晶棒,在抽运功率为 33 W 时,获得 912 nm 最大输出功率 3.0 W,斜率效率 16%,相应的对吸收抽运功率的斜率效率达 45%。在腔内插入声光(AO)Q 开关,当重复频率为 10 kHz 时,获得了脉冲宽度为 22 ns,平均功率为 660 mW,峰值功率达 3 kW。理论上分析了晶体的长度、浓度与准三能级激光器振荡阈值的关系,讨论了再吸收损耗对激光器的运转状态产生的影响,并通过实验观察了再吸收损耗的饱和效应。

关键词 激光技术; 879 nm 抽运; Nd:GdVO₄ 激光器; 准三能级

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A

Quasi-Three-Level Operation of Nd:GdVO₄ Laser Pumped by 879 nm Laser Diode

Gao Jing Yu Xin Zhang Zhen Zhang Wenping Chen Fei Peng Jiangbo
Li Xudong Yu Junhua Wang Yuezhu

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology,
Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract By use of novel 879 nm Laser Diode (LD), quasi-three-level transition in Nd:GdVO₄ crystal at room temperature is realized. For the crystal with Nd doped concentration of 0.2% and 3 mm×3 mm×3.8 mm in size, wavelength of 912 nm. The 912 nm laser with output power of 2.5 W when the pump power is 33 W, corresponding to a slope efficiency of 11% with respect to the pump power and a slope efficiency 38% with respect to the absorbed pump power. For the crystal with Nd doped concentration of 0.2% and 3 mm×3 mm×5 mm in size. The 912 nm laser with output power of 3.0 W is obtained when the pump power is 33 W, corresponding to a slope efficiency of 16% with respect to the pump power and a slope efficiency 45% with respect to the absorbed pump power. For the acousto-optic (A-O) Q-Switched regime, average output power of 660 mW and pulse duration of 22 ns is achieved at the repetition rate of 10 kHz, the peak power is up to 3 kW. The relationship between lasing threshold and the length and Nd doped concentration of crystal are theoretically analyzed. The influence of reabsorption loss on laser's operation is discussed and the saturation effect of reabsorption loss is observed.

Key words laser technique; 879 nm pump; Nd:GdVO₄ laser; quasi-three-level

1 引 言

近年来,由于激光二极管(LD)抽运的全固态蓝光激光器^[1]在光存储、激光彩显、生物和医疗诊断、拉曼光谱、高分辨率印刷和通信等领域有

广阔的应用前景,已经受到越来越多的关注,其中利用掺 Nd 激光介质准三能级跃迁产生的 900 nm 谱段的激光通过倍频转换至蓝光谱区被证明是一种有效的方式。Nd:GdVO₄ 晶体的⁴F_{3/2}→⁴F_{9/2}辐射跃

基金项目: 黑龙江省科技攻关项目(GC06A116)和哈尔滨工业大学优秀团队支持计划资助课题。

作者简介: 高 静(1982—),男,河南人,博士研究生,主要从事固体激光技术与光电子器件等方面的研究。

E-mail: owengaojing@126.com

导师简介: 王月珠(1942—),女,黑龙江人,博士生导师,主要从事固体激光器和光参量振荡器等方面的研究。

E-mail: juyl@hit.edu.cn

还可以产生 912 nm 激光,除了能够获得蓝光激光外,912 nm 激光器还可以用作掺 Yb 光纤激光器和光纤放大器的抽运源,此外,它在水蒸气探测和用于臭氧探测的差分吸收雷达(DIAL)上也有着重要的应用。1992 年,俄罗斯科学家 T. Jensen 等^[2]首先研制成功并报道了 Nd:GdVO₄ 新型晶体。由于其优良的物理化学特性和激光性能,已经受到了国际上越来越多的关注。其中利用 Nd:GdVO₄ 激光介质⁴F_{3/2} → ⁴I_{11/2} 跃迁产生 1063 nm 激光^[3]及其倍频 532 nm 绿光激光器研究^[4,5],⁴F_{3/2} → ⁴I_{13/2} 跃迁产生 1340 nm 激光及其倍频产生 670 nm 红光激光器研究^[6]较多。但对于准三能级⁴F_{3/2} → ⁴I_{9/2} 的 912 nm 谱线跃迁,由于其受激发射截面较小(约为 1063 nm 的 1/10),而且常温下激光下能级存在较多的粒子数布居,故产生激光振荡难度很大,人们对 912 nm 激光器的研究也较少。M. Schmidt 等^[7]利用 808 nm 激光二极管抽运 Nd:GdVO₄ 晶体,在输入功率为 1.2 W 时,首次得到 912 nm 连续激光输出 190 mW,斜率效率 24%。C. Czeranowsky 等^[8]通过 808 nm 激光二极管端面抽运 Nd:GdVO₄,在抽运功率为 16.7 W 时得到 2.1 W 的 912 nm 连续激光输出,斜率效率为 16%,相应的对吸收抽运功率的斜率效率为 33%,经 LBO 内腔倍频获得 0.84 W 的 456 nm 蓝光激光输出。

利用 879 nm 激光二极管抽运 Nd:GdVO₄ 晶体,与传统的 808 nm 激光二极管相比,虽然其有效吸收截面相对较小(对 808 nm $\sigma_a \approx 5.2 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$,对 879 nm $\sigma_a \approx 2.7 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$),但吸收线宽(FWHM)较大^[9](对 808 nm 约为 1.6 nm,对 879 nm 约为 2.3 nm)。对于⁴F_{3/2} → ⁴F_{9/2} 谱线跃迁,利用 879 nm 激光二极管直接抽运至激光上能级,量子损耗降低了 9%,有利于激光器斜率效率的提高和激光阈值的降低。而且,由于热弛豫降低了近 70%,使得晶体由于吸收抽运而产生的热大大减少,一方面有利于减小再吸收损耗,另一方面减小了热透镜效应,有利于实现激光器的高功率、高光束质量输出。

本文在对准三能级系统中激光阈值和再吸收损耗进行研究的基础上,利用新型 879 nm 激光二极管,选择合适的晶棒,有效抑制了四能级系统谱线的寄生振荡,在室温下成功实现了 912 nm 激光振荡,并在连续和声光(AO)调 Q 两种运转方式下进行了研究。

2 理论分析

1987 年, T. Y. Fan 等^[10]建立了准三能级系

统的再吸收模型,并得到阈值抽运功率 P_{th} 和饱和再吸收损耗 δ_s 的表达式为

$$P_{th} = \frac{\pi h\nu_p(\omega_l^2 + \omega_p^2)(L + T + 2\sigma_l N_l^0 l)}{4\sigma\tau(f_l + f_u)[1 - \exp(-\alpha l)]}, \quad (1)$$

$$\delta_s = \frac{N_l^0 \sigma_l I_{sat}}{I} \ln\left(1 + \frac{2I}{I_{sat}}\right), \quad (2)$$

式中 $h\nu_p$ 为单个抽运光子的能量, ω_p 和 ω_l 分别为抽运光和振荡光的光斑半径, σ 是受激发射截面, τ 为激光上能级寿命, f_l 和 f_u 分别为热平衡状态下激光上下能级的粒子数布居占各自多重态的比例, T 是谐振腔输出耦合镜的透射率, L 是谐振腔内包括散射损耗、衍射损耗在内的其他损耗(再吸收损耗除外), l 是激光晶体的长度, N_l^0 是激光下能级的布居粒子数密度, α 是激光晶体对抽运光的吸收系数。 I 为腔内振荡光的光强, I_{sat} 是振荡光的饱和光强, 可表示为 $I_{sat} = \frac{h\nu_l}{(f_l + f_u)\sigma\tau}$ 。

由(1)式可以看出,准三能级系统的阈值抽运功率表达式与四能级系统相比,仅仅多出 $2\sigma_l N_l^0 l$ 一项,这一项是由于激光下能级存在粒子数布居造成的,称为再吸收损耗,它直接导致了激光阈值的升高。为了减小激光器的再吸收损耗,尽量采用掺杂浓度较低、长度较短晶体。而且从(2)式可知再吸收损耗并不是一常量,随着腔内振荡光强度的增加,它将逐渐饱和,而激光器也将以类似四能级系统的方式运转。

3 实验装置

实验装置如图 1 所示。其中激光二极管为美国 NLight 公司生产的的光纤耦合激光二极管,最大输出功率为 120 W,循环水冷却,光纤芯径 400 μm ,数值孔径 $NA=0.22$ 。Nd:GdVO₄ 晶体沿 a 轴切割, Nd³⁺ 掺杂原子数分数为 0.2%。为了抑制 1063 nm 和 1340 nm 激光的寄生振荡,前腔镜 M_1 和输出镜 M_2 上都镀有对 1063 nm, 1340 nm 的增透膜,其中对 1063 nm 透射率大于 90%;输出镜 M_2 为平面镜,对 912 nm 激光的输出耦合率为 4%,晶体置于采用

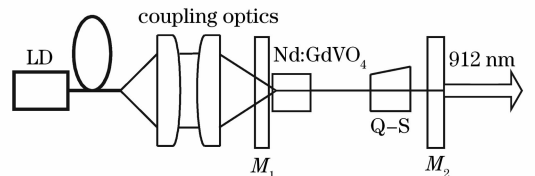


图 1 912 nm 激光器实验装置图

Fig. 1 Experimental setup of 912 nm laser

循环冷却水制冷的紫铜热沉上,水温为 13 ℃;声光 Q 开关由中国电子科技集团公司第二十六研究所生产,射频频率为 41 MHz,最大射频功率为 10 W。激光二极管输出的 879 nm 抽运光经非球面透镜系统耦合后,在晶体中聚焦成直径约 260 μm 的光斑。实验中的输出功率由相干公司生产的 Field mate 50W 探测,脉冲宽度 Δt 由 DET210/M 型 Si 光探测器探测,TDS3032B 示波器(美国 Tektronix 公司)显示脉冲波形。

4 实验结果及分析

分别采用 3 mm×3 mm×3.8 mm, 3 mm×3 mm×5 mm 的 Nd:GdVO₄ 晶体,有效抑制了作为四能级系统的 1063 nm 和 1340 nm 激光谱线跃迁,在室温下成功实现了 912 nm 激光的连续运转。如图 2 所示,对 3 mm×3 mm×3.8 mm 的晶棒,在抽运功率为 33 W 时,获得 912 nm 激光最大输出功率 2.5 W,斜率效率 11%,相应的对吸收抽运功率的斜率效率为 38%;对 3 mm×3 mm×5 mm 的晶棒,在抽运功率为 33 W 时,获得 912 nm 激光最大输出功率 3.0 W,斜率效率 16%,相应的对吸收抽运功率的斜率效率达 45%。实验中,在 879 nm 滤光片后面通过 Ocean Optics 公司生产的光纤光谱仪对激光器输出波长进行适时的监测,没有发现 1063 nm 激光谱线的振荡。

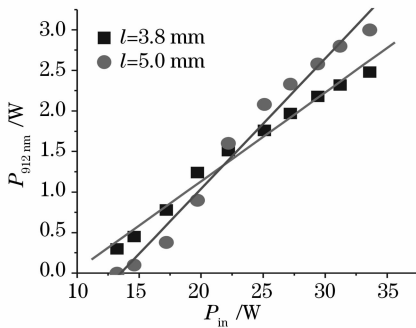


图 2 两种不同晶体的输入输出功率变化关系

Fig. 2 Input-output curves for two different crystals

从图 2 中可以看出,与 $l=3.8$ mm 的晶棒相比, $l=5$ mm 的晶棒激光阈值较高,这是由于在掺杂浓度相同的情况下,较长的晶棒存在较大的再吸收损耗,从而导致较高的阈值。另外, $l=5$ mm 的晶棒的输出功率和斜率效率都较高,这主要是由于它吸收了更多的抽运光,从而得到了更大的增益。

图 3 中可以看出,对于相同掺杂浓度的两种不同长度的 Nd:GdVO₄ 晶棒,其 912 nm 激光输出功

率随吸收抽运功率的变化关系近乎一致。在阈值功率附近,由于腔内振荡光强度 I 较低,再吸收损耗严重,故斜率较小。随着抽运功率的增加,腔内振荡光强度 I 逐渐变大,再吸收损耗逐渐减小,曲线呈现出非线性增长,斜率也随之增大。当满足 $I \gg I_{\text{sat}}$ 时,再吸收损耗达到饱和,它对激光器的影响可以忽略不计,此时 912 nm 激光器变为类似于四能级系统运行,斜率变得最大。当抽运功率达到一定程度,晶体中的热效应变得很明显,912 nm 的输出功率逐渐趋于饱和。

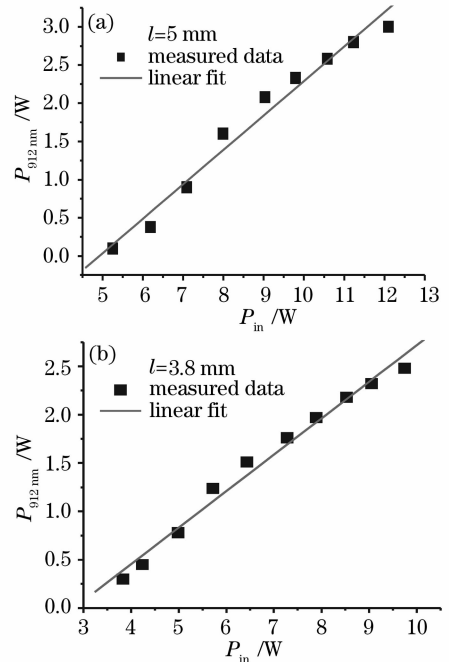


图 3 两种不同晶体随吸收抽运功率的变化关系
Fig. 3 Output power varies with absorbed pump power for two different crystals

为了实现 912 nm 激光的脉冲运转,在腔内插入声光 Q 开关。当重复频率 $f=10$ kHz 时,获得了脉冲宽度 $\Delta t=22$ ns,平均功率 $\bar{P}=660$ mW 的结果,峰值功率 P_M 达 3 kW,脉冲波形如图 4 所示。

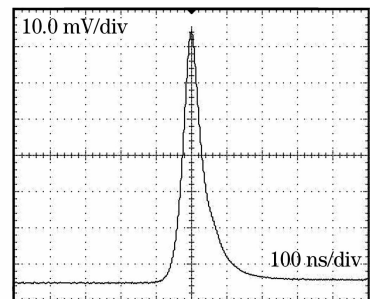


图 4 912 nm 声光调 Q 脉冲波形图

Fig. 4 Pulse profile of 912 nm A-O Q-switched laser

5 结 论

通过对准三能级系统中激光阈值和再吸收损耗的研究,利用新型 879 nm 激光二极管,选择合适的晶棒,有效抑制了四能级系统谱线的寄生振荡,在室温下成功实现了 912 nm 激光振荡。对掺杂原子数分数 0.2%, 3 mm×3 mm×5 mm 的晶棒,在抽运功率为 33 W 时,获得 912 nm 激光最大输出功率 3.0 W,斜率效率 16%,相应的对吸收抽运功率的斜率效率达 45%。从输入-输出曲线分析了再吸收损耗对于激光器阈值的影响,并得到了输出功率随抽运功率的变化曲线与再吸收损耗的饱和现象之间的内在联系。另外,通过声光调 Q,获得了 912 nm 激光的脉冲运转。当重复频率 $f=10$ kHz 时,获得了脉冲宽度 $\Delta t=22$ ns,平均功率 $\bar{P}=660$ mW,峰值功率 P_M 达 3 kW。

参 考 文 献

- 1 Li Haifeng, Zhou Rui, Zhao Pu *et al.*. 1386 nm continuous wave output from laser diode end pumped 1386 nm Nd:YVO₄ laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7): 1069~1072
李海峰,周睿,赵璞等. 激光二极管端面抽运 Nd:YVO₄ 实现 1386 nm 连续波激光输出[J]. 光学学报, 2006, **26**(7): 1069~1072
- 2 Li Xudong, Yu Xin, Yu Junhua *et al.*. Laser diode double-end-pumped acousto-optically Q-switched Nd:GdVO₄ laser with high repetition rate[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(4): 461~464
李旭东,于欣,于俊华等. 激光二极管双端抽运声光调 Q 高重复频率 Nd:GdVO₄ 激光器[J]. 中国激光, 2007, **34**(4): 461~464
- 3 T. Jensen, V. G. Ostroumov, J. P. Meyn *et al.*. Spectroscopic characterization and laser performance of diode laser pumped Nd:GdVO₄[J]. *Appl. Phys. B*, 1994, **58**(5): 373~379
- 4 Yin Zhao, Shen Deyuan, Ueda Ken-Ichi. A laser-diode pumped Nd:GdVO₄ laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(10): 1374~1377
尹钊,沈德元,植天宪. 激光二极管抽运的 Nd:GdVO₄ 激光器[J]. 光学学报, 2000, **20**(10): 1374~1377
- 5 Wei Wu, Guiqiu Li, Shengzhi Zhao *et al.*. Pulse width reduction in diode-pumped, doubly Q-switched Nd:GdVO₄/KTP green laser[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(7): 402~404
- 6 Du Chenlin, Qin Lianjie, Meng Xianlin *et al.*. Study of high-power continuous-wave 1.34 μm Nd:GdVO₄ laser end-pumped by laser-diode-array[J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(8): 681~683
杜晨林,秦连杰,孟宪林等. LD 抽运高功率连续波 1.34 μm Nd:GdVO₄ 激光器研究[J]. 中国激光, 2003, **30**(8): 681~683
- 7 M. Schmidt, E. Heumann, C. Czeranowsky *et al.*. Continuous wave diode pumped Nd:GdVO₄ laser at 912 nm and intracavity doubling to the blue spectral Range[C]. *Advanced Solid-State Lasers, Proceedings 50 of Trends in Optics and Photonics Series*, Optical Society of America, Seattle, 2001. 470~475
- 8 C. Czeranowsky, M. Schmidt, E. Heumann *et al.*. Continuous wave diode pumped intracavity doubled Nd:GdVO₄ laser with 840 mW output power at 456 nm[J]. *Opt. Commun.*, 2002, **205**(4): 361~365
- 9 N. Pavel, T. Taira. High-power continuous-wave intracavity frequency-doubled Nd:GdVO₄ LBO laser under diode pumping into the emitting level [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2005, **11**(3): 631~637
- 10 T. Y. Fan, R. L. Byer. Model and CW operation of a quasi-three-level 946 nm Nd:YAG laser [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1987, **QE-23**(5): 605~612