

激光二极管抽运的 Nd·GdVO₄ 激光器

尹 钊¹⁾ 沈德元^{1), 2)} 植田宪一²⁾

1), 徐州师范大学物理系, 徐州 221009

2), 电气通信大学激光极限技术研究中心, 东京 182-8585

摘 要 用高亮度激光二极管作抽运源, 研究了连续、腔内倍频和被动调 Q Nd·GdVO₄ 激光器的输出特性。在抽运功率为 881 mW 时获得了 119 mW 的连续绿光输出, 光-光转换效率 13.5%。用 Cr⁴⁺·YAG 作可饱和吸收体实现了 Nd·GdVO₄ 激光器的被动调 Q 运转, 脉冲宽度为 116~24 ns, 重复频率在 500 kHz~1.8 MHz 范围内可调。

关键词 激光二极管, Nd·GdVO₄, 腔内倍频, 被动调 Q 。

1 引 言

Nd·YVO₄ 晶体因其对 809 nm 抽运光有宽的吸收带, 吸收系数高和在 1.06 μm 处具有大的受激发射截面, 是一种适合激光二极管抽运的新型激光材料, 自 Zagumennyi^[1] 等首次报道以来引起了人们极大的兴趣^[2-7]。Nd·GRdVO₄ 除了具有在 1.06 μm 处受激发射截面大 ($7.6 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$) 和对 808 nm 的抽运光吸收谱带宽等特点外, 与 Nd·YVO₄ 相比它还有热导率高和对抽运光的吸收系数更高等特点。Nd·GdVO₄ 沿 c 轴的热导率高达 11.7 W/(m·K), 这使得它比 Nd·YVO₄ 更适合作为高功率激光材料。掺杂原子数分数为 0.012 的 Nd 时, 晶体在 808 nm 处的吸收系数达 78 cm^{-1} ^[2], 而掺杂 0.01 原子数分数的 Nd 时 Nd·YVO₄ 的吸收系数一般在 30~40 cm^{-1} 。所以 Nd·GdVO₄ 是微片激光器和利用激光材料的短程吸收来实现单纵模运转的单频激光器的理想工作物质^[8]。

尽管 Nd·GdVO₄ 有吸收系数高和热导率大等优点, 但对它的研究比起 Nd·YVO₄ 要相对来得少。特别是通过倍频的 Nd·GdVO₄ 绿光激光器, 仅在文献[2]中有所报道, 但绿光转换效率仅为 2.6%。本文用 1 W 高亮度激光二极管作抽运源, 研究了连续、腔内倍频和被动调 Q Nd·GdVO₄ 激光器的输出特性。

2 实验及结果

实验所用的抽运源是三井公司(日本)生产的发光元面积为 $1 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$ 、最大输出功率为 1 W 的高亮度激光二极管。激光二极管发射谱线的中心波长在 807.1 nm 附近, 线宽仅为 0.8 nm(FWHM)。激光二极管发出的光经一对 $f = 8 \text{ mm}$ 的透镜耦合聚焦到激光晶体上。焦

斑尺寸约为 $65 \mu\text{m} \times 70 \mu\text{m}$ ^[9]。Nd·GdVO₄ 掺 0.01 原子数分数的 Nd, *a* 轴切割, 尺寸 5.0 mm × 5.0 mm × 2.5 mm, 通光方向长度 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 μm 的增透膜以减少腔内损耗。在倍频实验中所用的倍频晶体是按 II 类相位匹配方向切割的 KTP, 尺寸为 4 mm × 4 mm × 5 mm, 两端均镀 1.06 μm 和 0.53 μm 的双色增透膜。实验采用端面抽运方式, 所用腔型为简单的两镜线性谐振腔。

2.1 连续 Nd·GdVO₄ 基频和腔内倍频激光器

用透过率 *T* 分别为 3%、5% 和 10% 的输出镜研究了 Nd·GdVO₄ 激光器的基频输出特性, 输出镜的曲率半径为 250 mm, 腔长约 1 cm, 抽运光的偏振方向平行于晶体 *c* 轴(π 偏振抽运)。图 1 给出了激光的输入输出功率曲线, 3 种不同透过率的输出镜所对应的斜效率分别为 43.3%、54.9% 和 58.7%。最好的结果是用 *T* = 10% 的输出镜所取得的, 在抽运功率为 900 mW 时获得了 490 mW 1.063 μm 的激光输出, 对应的光-光转换效率为 54%。根据不同透过率 *T* 所对应的斜效率 η_s 及公式^[10]

$$1/\eta_s = 1/\eta_{s0} + (\delta_0/\eta_{s0})(1/T),$$

可估计腔内损耗 δ_0 约为 1.8%。测量了激光输出波长随抽运功率的关系, 发现在所用的抽运功率范围内激光波长基本不变, 与报道的 Nd·GdVO₄ 激光器的输出波长的随抽运功率的增加而有 1.05×10^{-3} nm/mW 变化的现象有所不同^[11]。这可能是因为 Nd·GdVO₄ 的热导率较大, 在所用的抽运功率范围内晶体温度变化较小。

在腔内倍频实验中, 输出镜对 1.06 μm 基频光反射率 $R > 99.9\%$, 对绿光的透过率大于 95%, 输出镜的曲率半径为 100 mm。根据我们以前的

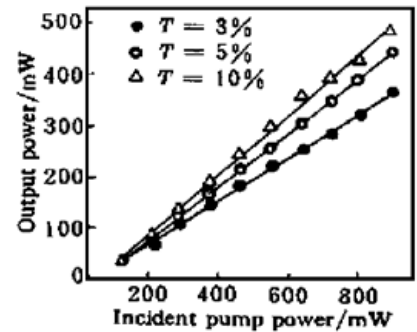


Fig. 1 Output power as a function of incident pump power for output couplers of transmissions 3%, 5% and 10%

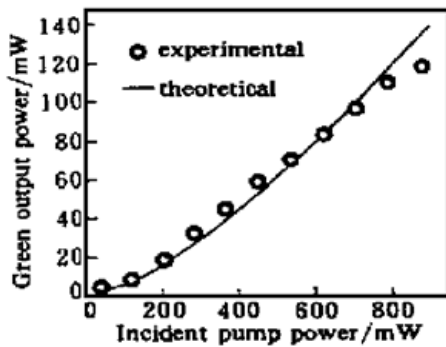


Fig. 2 Green output power as a function of the incident pump power

分析^[9], 在这种构型的腔内倍频激光器中, 兼顾腔模和抽运光束的匹配以及提高振荡光束在非线性材料中的能量密度是获得激光器高效运转的重要条件。根据抽运光斑的尺寸和输出镜的曲率半径, 实验中时选择腔长为 100 mm。KTP 与 Nd·GdVO₄ 晶体紧贴, 其快轴与 Nd·GdVO₄ 晶体的 *c* 轴成 45° 夹角。图 2 给出了输出镜端测得的绿光功率随入射抽运功率的变化关系, 在抽运功率为 881 mW 时获得了 119 mW 的连续绿光输出, 光-光转换效率 13.5%, 我们相信这是到目前为止最好的

结果。据文献[9], 高亮度激光二极管更有利于腔内倍频激光器实现高效率运转, 用和本文同样的抽运源和腔设计在 Nd·YVO₄/KTP 激光器中抽运光到绿光的转换效率可达 32.5%。Nd·GdVO₄ 激光器腔内倍频结果不如 Nd·YVO₄ 的原因可能有如下几方面。首先, 在 Nd·YVO₄ 的抽运端同时镀有 1.06 μm ($R > 99.8\%$) 和 0.53 μm ($R > 99\%$) 高反膜, 绿光为单端输出。而 Nd·GdVO₄ 的抽运端仅镀有作为腔镜的 1.06 μm 高反膜, 绿光为双端输出。其次, 测量表明 Nd·GdVO₄ 的腔内损耗比 Nd·YVO₄ 的大。在腔内同时含有激光和倍频晶体 KTP 的情况下用 3%、5% 和 10% 三种不同透过率的输出镜测量的 Nd·YVO₄/KTP 和 Nd·

GdVO₄/KTP 的损耗分别为 1.1% 和 1.9%。损耗是决定腔内倍频激光器输出效率的主要因素之一, 因此随着晶体质量的提高和损耗的减小, 腔内倍频 Nd·GdVO₄ 激光器的输出效率应该会得到极大的提高。另外, 与输出端反向传播的绿光对激光二极管的工作性能也会产生影响。

2.2 被动调 Q 运转

以 Cr⁴⁺·YAG 作为可饱和吸收体研究了被动调 Q Nd·GdVO₄ 激光器的工作特性, Cr⁴⁺·YAG 的初始透过率 T_0 分别为 90% 和 80%。所用输出镜的透过率为 5%, 曲率半径 250 mm, 腔长约 1 cm。图 3 给出了不同初始透过率的 Q 开关所对应的平均输出功率、脉冲宽度和调 Q 重复频率随抽运功率的变化关系。图 3(a) 为平均输出功率与入射抽运功率的关系, 可以看出, 平均输出功率随 Cr⁴⁺·YAG 的初始透过率降低而迅速减小, 在抽运功率为 880 mW 时, $T_0 = 90%$ 对应的输出功率为 240 mW, 而 $T_0 = 80%$ 时的输出功率仅为 75 mW。图 3(b) 给出了激光脉冲宽度与抽运功率的关系, 对于 T_0 为 90% 和 80% 的 Cr⁴⁺·YAG, 脉宽可调范围分别为 49~116 ns 和 24~96 ns。图 3(c) 给出了调 Q 重复频率与入射抽运功率的关系, 对于初始透过率为 80% 和 90% 的调 Q 片, 重复频率随抽运功率的变化范围分别为 0.54~1.19 MHz 和 0.51~1.82 MHz。在最大抽运功率 880 mW 时, T_0 为 90% 和 80% 的调 Q 片激光输出的脉冲能量分别为 0.13 μ J 和 0.16 μ J。由于 Nd·YVO₄ 的发射界面较大, 用 Cr⁴⁺·YAG 作为饱和吸收体来被动调 Q 时常需要采取特殊的措施使饱和吸收体中光束的尺寸小于增益介质中的尺寸, 从而实现被动调 Q 输出^[12, 13]。

注意到 Nd·GdVO₄ 情况与 Nd·YVO₄ 有所不同, 不象 Nd·YVO₄/Cr⁴⁺·YAG 激光器那样要采取特殊措施即可获得稳定的脉冲输出。但当后移输出镜使谐振腔的长度为 100 mm, 改变饱和吸收体在腔中的位置, Cr⁴⁺·YAG 移至输出镜附近时, 激光器不再有稳定的调 Q 输出。

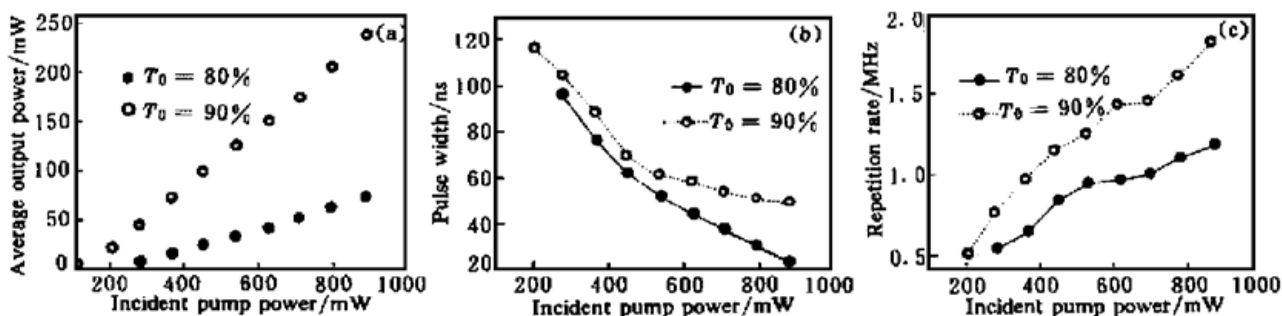


Fig. 3 Passive Q-switching performances of Nd·GdVO₄ laser for two piece of Cr⁴⁺·YAG with initial transmissions of $T_0 = 80$ and 90%. (a) Average output power. (b) Pulse width. (c) Repetition rate

结 论 用 1 W 高亮度激光二极管抽运, 研究了 Nd·GdVO₄ 激光器的连续、被动调 Q 和腔内倍频输出特性。在抽运功率为 881 mW 时获得了 119 mW 的连续绿光输出, 光-光转换效率 13.5%。用 Cr⁴⁺·YAG 作可饱和吸收体实现了 Nd·GdVO₄ 激光器的被动调 Q 运转, 脉冲宽度在 116~24 ns, 重复频率在 500 KHz~1.8 MHz 范围内可调。

参 考 文 献

- [1] Zagumennyi A I, Ostroumov V G, Shcherbakov I A *et al.*. The Nd·GdVO₄ crystal: A new material for diode-pumped lasers. *Kvantovaya Elektron. Mosk.*, 1992, **19**(12): 1149~1150
- [2] Jensen T, Ostroumov V G, Meyen J P *et al.*. Spectroscopic characterization and laser performance of

- diode-laser-pumped Nd·GdVO₄. *Appl. Phys. (B)*, 1994, **58**(5) : 373~ 379
- [3] Shimamura K, Uda S, Kochurikhin V V *et al.*. Growth and characterization of gadolinium vanadate GdVO₄ single crystals for laser applications. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1996, **35**(3) : 1832~ 1835
- [4] Zhang H J, Meng X L, Zhu L *et al.*. Investigations on the growth and laser properties of Nd·GdVO₄ single crystal. *Cryst. Res. Technol.*, 1998, **33**(5) : 801~ 806
- [5] Klimov J V, Tsvetkov V B, Shcherbakov L A *et al.*. CW diode pumped Nd·GdVO₄-laser passively Q-switched with Cr⁴⁺·YAG as saturable absorber. *OSA Trends in Optics and Photonics on Advanced Solid State Lasers*, 1996, **1**() : 438~ 440
- [6] Bartschke J, Klimov I V, Boller K J *et al.*. Passive Q-switching of diode end-pumped Na³⁺·GdVO₄ and Nd³⁺·YAB laser by using Cr⁴⁺·YAG and Cr⁴⁺·YSGG as saturable absorbers. *CLEO'95 (Conference on Lasers and Electro-optics)*, 1995, 126~ 127
- [7] Ter-Mikirtychev V V, Vlasenko O A, Zavartsev Y D *et al.*. Passive Q-switching of a fiber-optic module-pumped Nd·GdVO₄ laser with LiF·F₂. *Proc. SPIE*, 1995, **2379** : 141~ 143
- [8] Kintz G J, Baer T. Single-frequency operation in solid-state laser materials with short absorption depths. *IEEE J. Quantum. Electron.*, 1990, **QE-26**(9) : 1457~ 1459
- [9] Shen Deyuan, Liu Anping, Song Jie *et al.*. Efficient operation of an intracavity-doubled NdYVO₄/KTP laser end pumped by a high-brightness laser diode. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(33) : 7785~ 7788
- [10] Caird J A, Payne S A, Staver P R *et al.*. Quantum electronic properties of the Na₃Ga₂Li₃F₁₂ : Cr³⁺ laser. *IEEE J. Quantum. Electron.*, 1988, **QE-24**(6) : 1077~ 1099
- [11] 沈德元, 王长青, 邵宗书等. 激光二极管抽运高效 NdYVO₄ 激光器特性研究. *中国激光*, 1996, **A23**(1) : 19~ 22
- [12] Agnesi A, Acqua S D, Morello C *et al.*. Diode-pumped neodymium lasers repetitively Q-switched by Cr⁴⁺·YAG solid-state saturable absorbers. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 1997, **3**(1) : 45~ 52
- [13] Bai Yingxin, Wu Nianle, Zhang Jian *et al.*. Passively Q-switched NdYVO₄ laser with a Cr⁴⁺·YAG crystal saturable absorber. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(12) : 2468~ 2472

A Laser-Diode Pumped Nd·GdVO₄ Laser

Yin Zhao¹⁾ Shen Deyuan^{1), 2)} Ueda Ken-Ichi²⁾

1), Department of Physics, Xuzhou Normal University, Xuzhou 221009

2), Institute for Laser Science, University of Electro-Communications, Tokyo 182-8585

(Received 1 March 1999; revised 5 July 1999)

Abstract Characteristics of a high-brightness laser-diode end-pumped CW and passively Q-switched Nd·GdVO₄ laser were studied. Using KTP as the intracavity frequency doubler, 119 mW green output power was obtained at a pump power of 881 mW, corresponding to a optical-to-optical efficiency of 13.5%. Passively Q-switched operation was realized using Cr⁴⁺·YAG as the saturable absorber. Stable pulses with pulse duration of 116 ~ 24 ns and repetition rate of 500 KHz~ 1.8 MHz were generated.

Key words laser diode, Nd·GdVO₄, intracavity frequency doubling, Cr⁴⁺·YAG, passively Q-switching.