

文章编号: 0258-7025(2010)12-2954-04

Nd:GdVO₄/Cr:YAG 微片式脉冲激光器

廖明墩 王正平* 于浩海 张怀金 陈丽娟 庄士栋 郭磊 赵永光 王继扬 许心光

(山东大学晶体材料国家重点实验室, 山东 济南 250100)

摘要 以 Cr:YAG 作为可饱和吸收体, 实现了激光二极管(LD)端面抽运 Nd:GdVO₄ 晶体的微片式被动调 Q 激光器。Nd:GdVO₄ 晶体的尺寸为 3 mm×3 mm×1 mm, *a* 向切割, Nd³⁺ 掺杂原子数分数为 0.5%, 抽运端面镀有对 808 nm 增透和对 1.06 μm 高反的双色膜, 作为激光谐振腔的输入镜。Cr⁴⁺:YAG 的尺寸为 φ9.5 mm×1.1 mm, 初始透射率为 77%, 其外端面镀有对 1.06 μm 透射率为 15% 的部分反射膜, 作为激光谐振腔的输出镜。谐振腔的长度为 5~6 mm。激光的抽运阈值为 4.62 W, 当抽运功率为 13.86 W 时, 最大平均输出功率为 0.98 W, 相应的光-光转换效率为 7%, 斜率效率为 9.5%, 最高重复频率、最大单脉冲能量和最短脉冲宽度分别为 23.4 kHz, 44.6 μJ 和 2.9 ns, 相应的峰值功率为 15.4 kW。

关键词 激光器; Nd:GdVO₄ 晶体; Cr:YAG 晶体; 微片; 被动调 Q

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103712.2954

Nd:GdVO₄/Cr:YAG Microchip Pulse Laser

Liao Mingdun Wang Zhengping Yu Haohai Zhang Huaijin Chen Lijuan
Zhuang Shidong Guo Lei Zhao Yongguang Wang Jiyang Xu Xinguang

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

Abstract With Cr:YAG as the saturable absorber, passively Q-switched microchip laser is obtained by laser diode (LD) end-pumped Nd:GdVO₄ crystal. The Nd:GdVO₄ crystal is *a*-cut with the size of 3 mm×3 mm×1 mm, and the atom fraction of Nd³⁺ ions is 0.5%. The pump end face of Nd:GdVO₄ crystal is anti-reflective coated for 808 nm and high-reflective coated for 1.06 μm, which serves as the input mirror of laser cavity. The size of Cr⁴⁺:YAG is φ9.5 mm×1.1 mm, the initial transmission is 77%, and its outer end face is partially reflective coated for 1.06 μm (*T*=15%), which serves as the output mirror of laser cavity. The total length of laser cavity is 5~6 mm. The pump threshold of the laser is 4.62 W. When the pump power reaches 13.86 W, a maximum average output power of 0.98 W is obtained, corresponding to optical conversion efficiency of 7%, and slope efficiency of 9.5%. The highest repetition rate, largest pulse energy and shortest pulse width are measured to be 23.4 kHz, 44.6 μJ, and 2.9 ns respectively, corresponding to peak power of 15.4 kW.

Key words lasers; Nd:GdVO₄ crystal; Cr:YAG crystal; microchip; passively Q-switched

1 引 言

在形形色色的激光二极管(LD)抽运固体激光器中,微片激光器的结构最为简单和紧凑,便于集成和实现大规模批量生产,可应用于科研、医疗、工业和军事等领域,是全固态激光器的一个重要分

支^[1~14]。微片激光器是一种具有微型腔结构的端面抽运固体激光器件,其典型结构是在激光介质的两个通光端面或者激光介质和饱和吸收体的端面上分别镀以介质膜,形成微型振荡腔。由于微片激光器的腔长很短,为了保证低阈值、高效率以及高稳定

收稿日期: 2010-05-19; 收到修改稿日期: 2010-07-26

基金项目: 国家自然科学基金(60978027)、中国博士后科学基金(200904501184)、山东省自然科学基金(ZR2009FM015)、山东省博士后创新基金(200802029)、111 引智计划和山东省泰山学者计划资助课题。

作者简介: 廖明墩(1984—),男,硕士研究生,主要从事全固态激光器方面的研究。E-mail: mdliao@mail.sdu.edu.cn

导师简介: 许心光(1964—),男,博士,教授,主要从事晶体物理与晶体器件等方面的研究。E-mail: xgxu@sdu.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: zpwang@sdu.edu.cn

性,要求增益介质必须具备大的吸收和发射截面,特别是良好的热学性能。钕离子掺杂的钒酸盐晶体就是满足这些条件的一类材料,具有代表性的有 Nd:YVO₄, Nd:GdVO₄, Nd:LuVO₄ 等。与 Nd:YVO₄ 和 Nd:LuVO₄ 相比, Nd:GdVO₄ 晶体除了同样具有易生长、吸收和发射截面大、偏振输出等性质之外,还具有热导率更高的显著优势[11.4 W/(m·K)]^[15],有利于其在高功率微片式脉冲激光器中的应用。

本文将谐振腔全反镜镀在 Nd:GdVO₄ 晶体上,将谐振腔耦合输出镜镀在 Cr:YAG 可饱和吸收体上,有效缩短了激光腔尺寸,实现了 Nd:GdVO₄/Cr:YAG 微片结构的被动调 Q 输出,最短脉冲宽度为 2.9 ns,最大单脉冲能量和最高峰值功率分别为 44.6 μJ 和 15.4 kW。

2 实验装置

图 1 为实验装置图。采用端面抽运方式,所用光纤耦合 LD 的中心波长为 808 nm,通过透镜系统聚焦到晶体上的抽运光斑半径约为 0.256 mm。Nd:GdVO₄ 晶体的尺寸为 3 mm×3 mm×1 mm, a 向切割, Nd³⁺ 掺杂原子数分数为 0.5%, 两个端面抛光,其中一个端面镀对 808 nm 增透和对 1.06 μm 高反的双色膜,作为激光谐振腔的输入镜 M1,晶体的另一端面镀 1.06 μm 增透膜。Cr³⁺:YAG 可饱和吸收片(尺寸为 φ9.5 mm×1.1 mm)的初始透射率为 77%,在其输出端面上镀有对 1.06 μm 透射率为 15% 的部分反射膜作为输出腔镜 M2。为了有效地释放实验中的热量, Nd:GdVO₄ 晶体的侧面被包上铝箔,放入水冷的铜块内,水温保持在 14 °C 左右。Cr³⁺:YAG 被放入铜块内,没有外接水冷循环系统。激光晶体与饱和吸收体尽量靠近,谐振腔的长度为 5~6 mm。

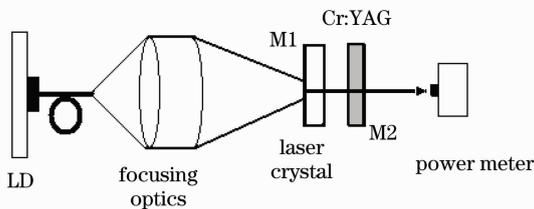


图 1 实验装置

Fig. 1 Experimental setup

3 实验结果与讨论

图 2,3 分别为平均输出功率和脉冲重复频率随入射抽运功率的变化关系。激光的抽运阈值为 4.62 W,在 13.86 W 的抽运功率下,平均输出功率

为 0.98 W,相应的光-光转换效率为 7%,斜率效率为 9.5%。脉冲重复频率随抽运功率的增加而逐渐增大,在 13 W 的抽运功率下得到了 23.4 kHz 的最高重复频率。

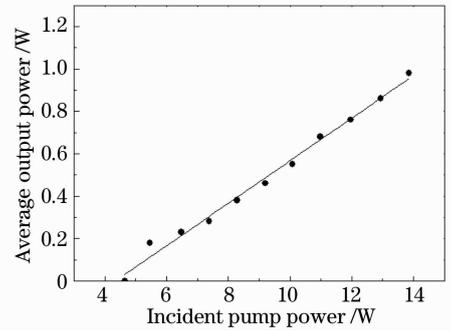


图 2 平均输出功率随入射抽运功率的变化关系

Fig. 2 Average output power versus incident pump power

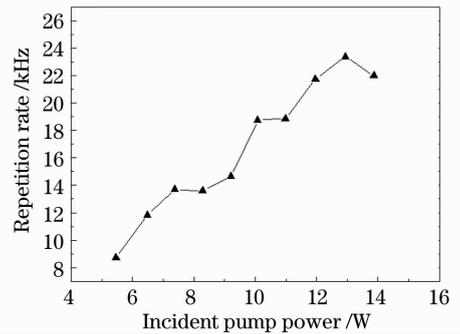


图 3 重复频率随入射抽运功率的变化关系

Fig. 3 Repetition rate versus incident pump power

由平均输出功率和脉冲重复频率可以计算出单脉冲能量随入射抽运功率的变化,如图 4 所示。当入射抽运功率为 13.86 W 时,获得最大单脉冲能量 44.6 μJ。

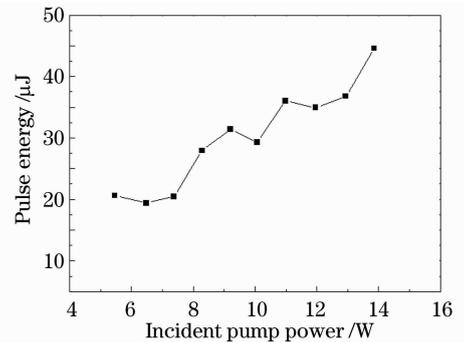


图 4 脉冲能量随入射抽运功率的变化关系

Fig. 4 Pulse energy versus incident pump power

图 5 为脉冲宽度随抽运功率的变化。随着抽运功率的上升,脉冲宽度呈逐渐下降的趋势。入射抽运功率为 13.86 W 时,最短脉宽为 2.9 ns。由单脉冲能量和脉冲宽度的变化,可以得到脉冲峰值功率

随入射抽运功率的变化,如图 6 所示。在 13.86 W 的抽运功率下得到 15.4 kW 的最大峰值功率。此时激光输出的单脉冲波形如图 7 所示,其中插图为相应的脉冲序列。

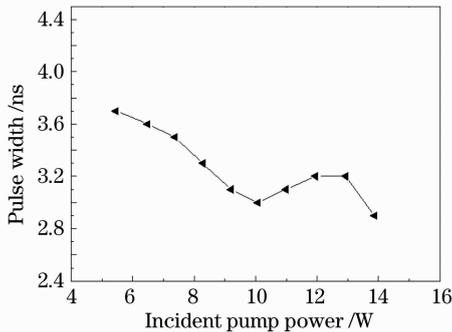


图 5 脉冲宽度随入射抽运功率的变化关系

Fig. 5 Pulse width versus incident pump power

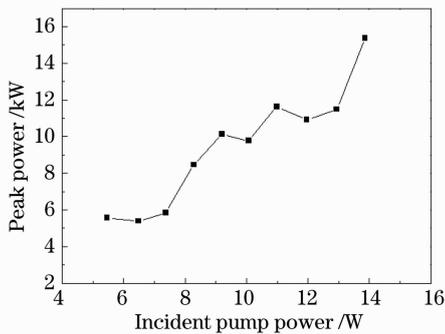


图 6 峰值功率随入射抽运功率的变化关系

Fig. 6 Peak power versus incident pump power

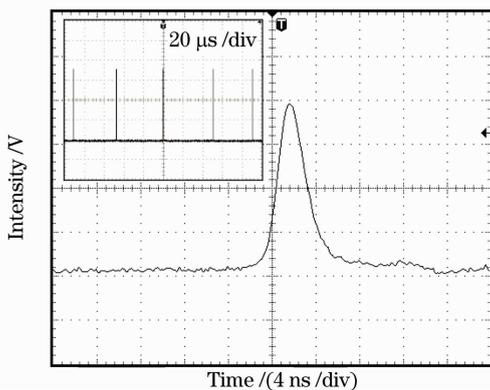


图 7 入射抽运功率为 13.86 W 时的单脉冲波形及脉冲序列

Fig. 7 Pulse profile and pulse train at an incident pump power of 13.86 W

2006 年, Forget 等^[5]报道了 c 向切割 Nd:GdVO₄ 晶体的 Cr:YAG 被动调 Q 微片式激光器, 晶体厚度为 1 mm, Nd³⁺ 掺杂原子数分数为 1%, 最终获得了 400 mW 的平均输出, 最短脉冲宽度为 1.1 ns, 最高重复频率 85 kHz, 相应的单脉冲能量

和峰值功率分别为 4.2 μ J 和 4 kW。这里所用 Nd:GdVO₄ 晶体的厚度也是 1 mm, Nd³⁺ 掺杂原子数分数仅为 0.5%, 为了有效克服掺杂浓度低、吸收效率差的缺点, 采用了 a 向切割的方式, 利用了 Nd:GdVO₄ 晶体 c 偏振吸收系数和发射截面大、热导率高的优势, 便于提高输出功率和转换效率。根据微片式激光器的被动调 Q 理论^[16~18], 对于一定的输出镜反射率 R , 降低可饱和吸收体的初始透射率 T_0 和增加激光介质内腔模的有效面积可以提高脉冲能量, 而缩短腔长可以减小脉宽。文献[5]中, $R = 85\%$, $T_0 = 84\%$, 晶体内抽运光斑的半径为 50 μ m。这里使用了与文献[5]相同的 R , 但 $T_0 = 77\%$, 晶体内抽运光斑的半径为 256 μ m, 在平-平腔的微片式结构中抽运光斑大意味着激光介质内腔模的有效面积也大, 这些条件有利于脉冲能量的提高。虽然较大的腔长导致所获得的最短脉宽也较大 (2.9 ns), 但提高的脉冲能量平均以后仍能得到高的峰值功率。以上分析与实验结果相符, 通过这些改进在平均输出功率、单脉冲能量、峰值功率方面均获得了比文献[5]更好的结果。

4 结 论

利用直接在 Nd:GdVO₄ 晶体和 Cr:YAG 晶体的端面镀介质膜的方法, 成功实现了 Nd:GdVO₄/Cr:YAG 被动调 Q 微片激光器。当抽运功率为 13.86 W 时, 最大平均输出功率为 0.98 W, 相应的光-光转换效率为 7%, 斜率效率为 9.5%, 最高重复频率、最短脉冲宽度分别为 23.4 kHz 和 2.9 ns, 相应的单脉冲能量和峰值功率为 44.6 μ J 和 15.4 kW, 优于此前国外类似装置的报道值。由于 Nd:GdVO₄ 和 Cr:YAG 的外形不同, 无法放在同一夹具内, 实验中它们之间仍有 3~4 mm 的距离。被动调 Q 微片激光器的理论及实验均已表明^[16], 缩短腔长有利于短脉冲输出, 因此如能改变设计而实现 Nd:GdVO₄ 与 Cr:YAG 的紧贴, 使腔长达到最短, 同时再对 Nd:GdVO₄ 晶体的掺杂浓度和长度及 Cr:YAG 晶体的初始透射率和激光耦合输出率等参数进行优化, 相信可以获得更短脉冲以及更佳的被动调 Q 效果。研究表明, Nd:GdVO₄ 晶体是被动调 Q 微片激光器的优良激光介质, 其良好的光学和热学性能有利于高功率、高效率、高性能微片脉冲激光的产生。

参 考 文 献

1 J. J. Zayhowski, A. Mooradian. Single-frequency microchip Nd

- lasers[J]. *Opt. Lett.*, 1989, **4**(1): 24~26
- 2 J. J. Zayhowski. Microchip lasers [J]. *Opt. Mat.*, 1999, **11**(2-3): 255~267
- 3 J. Šulc, H. Jelínková, K Nejezchleb *et al.*. Nd:YAG/V:YAG monolithic microchip laser operating at 1.3 μm[J]. *Opt. Mat.*, 2007, **30**(1): 50~53
- 4 J. J. Zayhowski. Passively Q-switched Nd:YAG microchip lasers and applications[J]. *J. Alloys and Compounds*, 2000, **303-304**: 393~400
- 5 S. Forget, F. Druon, F. Balembois *et al.*. Passively Q-switched diode-pumped Cr⁴⁺:YAG/Nd³⁺:GdVO₄ monolithic microchip laser[J]. *Opt. Commun.*, 2006, **259**(2): 816~819
- 6 Xu Fanghua, Ma Lili, Wang Zhengping *et al.*. Laser diode-pumped Nd:GdVO₄ microchip laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(9): 1166~1168
徐方华, 马丽丽, 王正平等. 激光二极管抽运 Nd:GdVO₄ 微片激光器[J]. *中国激光*, 2005, **32**(9): 1166~1168
- 7 Xu Fanghua, Wang Zhengping, Zhang Huaijin *et al.*. Study on the properties of LD-pumped Nd:LuVO₄ microchip laser[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(7): 3950~3954
徐方华, 王正平, 张怀金等. LD泵浦 Nd:LuVO₄ 微片激光器性能研究[J]. *物理学报*, 2007, **56**(7): 3950~3954
- 8 Hu Miao, Chen Jun, Ge Jianhong *et al.*. Temporal characteristics of the gain-switched microchip laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(4): 475~480
胡森, 陈军, 葛剑虹等. 增益开关型微片激光器的时间特性[J]. *中国激光*, 2007, **34**(4): 475~480
- 9 Yao Baoquan, Wang Qi, Wang Yuezhu *et al.*. Experimental study of (Tm, Ho):YLF microchip laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(10): 1216~1218
姚宝权, 王骐, 王月珠等. (Tm, Ho):YLF 微片激光器的实验研究[J]. *光学学报*, 2002, **22**(10): 1216~1218
- 10 Ma Liping, Hu Hongzhang, Li Zengzhi *et al.*. Nd:YVO₄ microchip laser with a plano/plano cavity end-pumped by LD[J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(6): 485~487
马立苹, 胡鸿璋, 李增智等. LD泵浦 Nd:YVO₄ 的平-平腔微片激光器[J]. *中国激光*, 2000, **A27**(6): 485~487
- 11 Shi Peng, Li Jinping, Chen Wen *et al.*. Thermal effect of Nd:GdVO₄ cube microchip laser with back surface cooling [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1772~1776
史彭, 李金平, 陈文等. 背冷式方形 Nd:GdVO₄ 微片激光器的热效应[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1772~1776
- 12 Li Qiang, Cai Yanfang, Jiang Menghua *et al.*. Laser diode array side pumped Nd:YAG thin disk laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1793~1797
李强, 蔡艳芳, 姜梦华等. 激光二极管侧面抽运的 Nd:YAG 薄片激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1793~1797
- 13 Wang Zhenguo, Zhang Yunjun, Shao Xiaowei *et al.*. Short-term frequency stability measurement of 2 μm Tm,Ho:YLF microchip laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(s1): 38~40
王振国, 张云军, 邵晓巍等. 2 μm Tm,Ho:YLF 微片激光器短期频率稳定度的检测[J]. *中国激光*, 2008, **35**(s1): 38~40
- 14 Ju Youlun, Wang Zhenguo, Wang Lei *et al.*. Short-term frequency instability measurement of 2 μm single longitudinal-mode laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(11): 2164~2168
鞠有伦, 王振国, 王磊等. 2 μm 单纵模激光频率短期不稳定性度的测量[J]. *光学学报*, 2008, **28**(11): 2164~2168
- 15 F. Q. Liu, H. R. Xia, Z. C. Ling *et al.*. Diode-pumped Q-switched intracavity frequency-doubled Nd:LuVO₄/KTP green laser[J]. *Laser Phys.*, 2008, **18**(8): 954~957
- 16 H. Sakai, H. Kan, T. Taira. >1 MW peak power single-mode high-brightness passively Q-switched Nd³⁺:YAG microchip laser [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(24): 19891~19899
- 17 J. J. Degnan. Optimization of passively Q-switched lasers[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1995, **31**(11): 1890~1901
- 18 J. J. Degnan. Theory of the optimally coupled Q-switched laser [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1989, **25**(2): 214~220