

文章编号: 0258-7025(2009)01-0019-04

# 主动调 $Q$ 内腔式 Nd:YAG/GdVO<sub>4</sub> 拉曼激光器

丛振华 张行愚 王青圃 李述涛 陈晓寒 张晓磊

(山东大学信息科学与工程学院, 山东 济南 250100)

**摘要** 研究了激光二极管(LD)端面抽运的主动调  $Q$  内腔式 Nd:YAG/GdVO<sub>4</sub> 拉曼激光器的激光特性, 测量了不同抽运功率和脉冲重复频率条件下的平均输出功率和脉冲宽度。当注入的抽运功率为 7.44 W, 脉冲重复频率为 20 kHz 时获得的 1174.5 nm 拉曼光的最大平均输出功率为 1.3 W, 对应的光-光转换效率为 17.4%; 当注入抽运功率为 6.8 W, 脉冲重复频率为 15 kHz 时获得的 1174.5 nm 拉曼光的最大单脉冲能量为 74.4  $\mu$ J。与 Nd:GdVO<sub>4</sub> 自拉曼激光器进行实验比较和分析, 实验结果表明主动调  $Q$  内腔式 Nd:YAG/GdVO<sub>4</sub> 拉曼激光器可以获得比 Nd:GdVO<sub>4</sub> 自拉曼激光器更高的平均输出功率和转换效率。

**关键词** 激光器; 内腔拉曼激光器; 受激拉曼散射; GdVO<sub>4</sub> 晶体; 主动调  $Q$

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093601.0019

## Actively $Q$ -Switched Intracavity Nd:YAG/GdVO<sub>4</sub> Raman Laser

Cong Zhenhua Zhang Xingyu Wang Qingpu

Li Shutao Chen Xiaohan Zhang Xiaolei

(School of Information Science and Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250100, China)

**Abstract** The characteristics of a laser diode (LD) end-pumped actively  $Q$ -switched Nd:YAG/GdVO<sub>4</sub> Raman laser are studied. The average output power and pulse width are measured at the different pump power and pulse repetition frequency. At a repetition rate of 20 kHz and an incident pump power of 7.4 W, an average output power of 1.3 W is obtained, and the corresponding optical-to-optical conversion efficiency is 17.4%. The maximum pulse energy of 74.4  $\mu$ J is obtained with a repetition rate of 15 kHz and an incident pump power of 6.8 W. Compared with Nd:GdVO<sub>4</sub> self-Raman laser, the actively  $Q$ -switched Nd:YAG/GdVO<sub>4</sub> Raman laser has a higher average output power and a higher conversion efficiency at the same experimental conditions.

**Key words** lasers; intracavity Raman laser; stimulated Raman scattering; GdVO<sub>4</sub> crystal; active  $Q$ -switching

## 1 引 言

受激拉曼散射是一种重要的激光变频技术, 是产生新激光谱线的一种重要方法。与气体、液体拉曼激光器相比, 固体拉曼激光器具有性能稳定、体积小、效率高等优点<sup>[1~5]</sup>。1992 年, A. I. Zagumennyi 等<sup>[6]</sup>首次在实验室长出 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体。由于 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体具有较大的发射截面和较高的热导率, 被证明是一种优良的激光介质<sup>[7~10]</sup>。2001 年, A. A. Kaminskii 等<sup>[11]</sup>发现 GdVO<sub>4</sub> 还是一种优良

的拉曼介质。2004 年, Y. F. Chen<sup>[12,13]</sup>先后报道了主动调  $Q$  和被动调  $Q$  的 Nd:GdVO<sub>4</sub> 自拉曼激光器。同年, T. T. Basiev 等<sup>[14]</sup>使用 LiF:F<sub>2</sub><sup>-</sup> 作为饱和吸收体, 采用被动调  $Q$  的 Nd:GdVO<sub>4</sub> 自拉曼激光器获得了 500 ps 的拉曼光脉冲。Fufang Su 等<sup>[15]</sup>对 Nd:GdVO<sub>4</sub> 自拉曼激光器进行了详细的理论和实验研究。虽然 Nd:GdVO<sub>4</sub> 自拉曼激光器的体积小、结构简单, 但是它不易调节、难以实现最佳化等缺点。上述研究均侧重于 Nd:GdVO<sub>4</sub> 自拉曼激光器。本

收稿日期: 2008-05-14; 收到修改稿日期: 2008-07-01

基金项目: 国家自然科学基金(60778012)资助项目。

作者简介: 丛振华(1981—), 男, 博士研究生, 主要从事激光物理与技术方面的研究。

E-mail: congzhenhua@mail.sdu.edu.cn

导师简介: 张行愚(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 长期从事激光物理、光电子学方面的教学与科研工作。

E-mail: xyz@sdu.edu.cn

文研究用 Nd:YAG 作激光介质, Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体只作拉曼介质的内腔式拉曼激光器。通过与 Nd:GdVO<sub>4</sub> 自拉曼激光器的实验比较和分析发现在相同的抽运功率和脉冲重复频率下, 主动调 Q 的内腔式 Nd:YAG/GdVO<sub>4</sub> 拉曼激光器可以获得比 Nd:GdVO<sub>4</sub> 自拉曼激光器更高的平均输出功率和转换效率。

## 2 实 验

实验装置如图 1 所示, 端面抽运光源为 808 nm 的激光二极管(LD), 最大功率为 30 W, 光纤的纤芯直径为 400  $\mu\text{m}$ , 数值孔径(NA)为 0.22。抽运光经耦合透镜进入谐振腔。该谐振腔为一个由后腔镜  $M_1$  和输出镜  $M_2$  组成的平凹腔, 长度为 95 mm。其中,  $M_1$  的曲率半径为 1000 mm, 镀有 808 nm 的增透膜 ( $HT > 97\%$ ) 和 1000~1200 nm 的高反膜 ( $R > 99.8\%$ );  $M_2$  为平镜, 镀有 1064 nm 的高反膜 ( $R = 99.9\%$ ), 并对 1174 nm 的拉曼光部分透射 ( $R = 94.2\%$ )。谐振腔内依次放置 Nd:YAG 激光介质、声光调 Q 晶体和 Nd:GdVO<sub>4</sub> 拉曼晶体。Nd:YAG 激光晶体的掺杂原子数分数为 1%, 尺寸为  $\phi 5 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ , 两端截面均镀有 1000~1200 nm 的增透膜 ( $R < 0.2\%$ )。声光调 Q 晶体的长度为 30 mm, 两端镀有 1064 nm 的增透膜。Nd:GdVO<sub>4</sub> 拉曼介质的尺寸为  $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ , 两端截面镀有 1000~1200 nm 的增透膜, 沿  $a$  轴方向切割, 晶体的掺杂原子数分数为 0.2%。上述所有晶体均用通水的金属块包裹, 水温恒为 18  $^{\circ}\text{C}$ 。 $M_3$  为分光镜, 对 1064 nm 基频光高反, 对 1174 nm 拉曼光高透。激光器的平均输出功率由功率计(Molelectron PM3)测量, 并由连接在功率计上的 Molelectron EPM2000 显示。脉冲波形由快速 PIN 管接收, 并在 Tektronix 数字示波器(TDS 3032B)上显示; 光谱信息则由光谱仪(Yokogawa AQ 6315A, 350~1750 nm)记录。

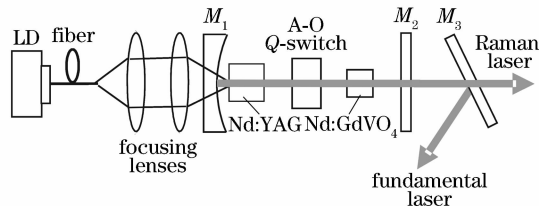


图 1 LD 端面抽运主动调 Q 内腔式 Nd:YAG/GdVO<sub>4</sub> 拉曼激光器实验装置

Fig. 1 Experimental arrangement of the LD end-pumped actively Q-switched Nd:YAG/GdVO<sub>4</sub> Raman laser

## 3 结果与讨论

在图 1 所示的实验装置中, Nd:YAG 激光晶体产生的 1064 nm 基频光经 Nd:GdVO<sub>4</sub> 拉曼介质时由于受激拉曼散射的作用转换为拉曼光。据文献[11]报道, Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体产生的拉曼光相对于基频光的频移由  $\omega_{R1} = 882 \text{ cm}^{-1}$ ,  $\omega_{R2} = 807 \text{ cm}^{-1}$  和  $\omega_{R3} = 256 \text{ cm}^{-1}$  组成, 分别对应于 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体中 VO<sub>4</sub><sup>3-</sup> 离子团的振动模, 其中最强的振动模为  $\omega_{R1} = 882 \text{ cm}^{-1}$ 。图 2 是用光谱仪测出的光谱特性, 基频光的波长为 1064.2 nm, 在低抽运功率下测得的拉曼光的波长有 1174.5 nm 和 1164.3 nm, 对应的频移分别为  $882 \text{ cm}^{-1}$  和  $807 \text{ cm}^{-1}$ 。实验中没有发现频移为  $256 \text{ cm}^{-1}$  的拉曼光, 原因为: 一是  $256 \text{ cm}^{-1}$  拉曼频移的拉曼增益小, 产生的拉曼光较少; 二是输出镜  $M_2$  对  $256 \text{ cm}^{-1}$  拉曼频移所产生的 1094 nm 拉曼光的透过率太小 ( $T = 0.15\%$ ), 难以形成有效的输出。由于同样的原因, 波长为 1164.3 nm 的拉曼光的输出功率也很小, 并且随着抽运功率的增加, 波长为 1164.3 nm 的拉曼光所占的比例会越来越小。由于输出镜  $M_2$  对基频光的反射率为 99.9%, 所以输出光中有少量的 1064 nm 基频光。使用分光镜  $M_3$  将 1064 nm 基频光从输出光中分离并利用示波器对拉曼光和基频光同时进行记录, 可以得到拉曼光和基频光的脉冲波形图, 如图 3 所示。从图中可以看出当调 Q 开关开启后, 腔内首先形成振荡的是 1064 nm 的基频光, 当腔内的基频光强度达到一定程度时基频光开始迅速向拉曼光转换, 所以基频光迅速衰减, 而拉曼光则迅速增强。

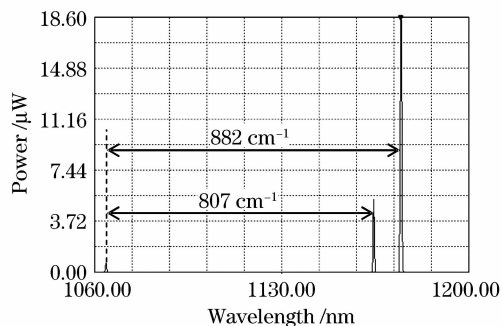


图 2 1064 nm 基频光和 1164 nm, 1174 nm 拉曼光的光谱图

Fig. 2 Optical spectra for the 1064 nm fundamental laser and 1164 nm, 1174 nm Raman lasers

使用功率计测量不同抽运功率和脉冲重复频率下拉曼光的平均输出功率, 如图 4 所示。从图 4 可以看出低抽运功率时随着脉冲重复频率的增加, 拉

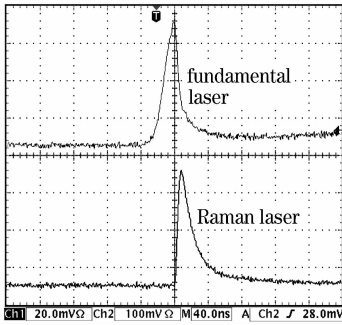


图 3 1064 nm 基频光和 1174 nm 拉曼光的波形图

Fig. 3 Typical wave profiles for the fundamental laser at 1064 nm and Raman laser at 1174 nm

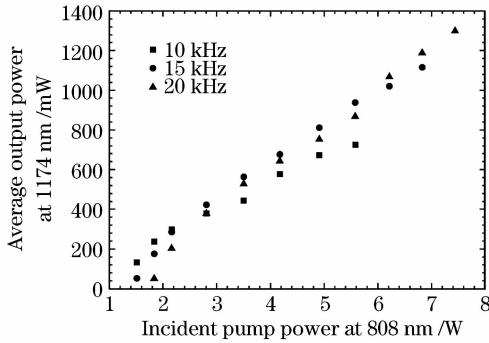


图 4 不同脉冲重复频率时拉曼光的平均输出功率随抽运功率的变化

Fig. 4 Average output power of the Raman laser with respect to the incident pump power for different pulse repetition rates

曼转换效率降低, 阈值增大; 脉冲重复频率为 10 kHz, 15 kHz 和 20 kHz 时对应的阈值抽运功率分别为 0.94 W, 1.32 W 和 1.65 W。这是因为拉曼效应为三阶非线性效应, 拉曼光的产生需要腔内基频光具有较高的功率密度, 而脉冲重复频率的增大意味着激光晶体内反转粒子数积累时间的减小, 从而需要较高的抽运功率以达到拉曼转换阈值。当抽运功率较小时, 在相同抽运功率下脉冲重复频率为 10 kHz 时的拉曼功率高于 15 kHz 和 20 kHz 时; 随着抽运功率的增大, 由于腔内的热透镜、自聚焦等效应的影响, 基频光向拉曼光的转换效率变低, 导致整个激光器的拉曼输出增长变缓, 当抽运功率为 2.4 W 时, 脉冲重复频率为 15 kHz 的拉曼输出功率超过 10 kHz 的输出功率。同理, 当抽运功率为 6.3 W 时, 20 kHz 的拉曼输出功率超过 15 kHz 的输出功率。当抽运功率为 7.44 W, 脉冲重复频率为 20 kHz 时获得的 1174 nm 拉曼光的最大平均输出功率为 1.3 W, 此时, 从注入的 LD 抽运光到拉曼光的光-光转换效率为 17.4%。

图 5 和图 6 分别为不同脉冲重复频率下拉曼光的单脉冲能量和脉冲宽度随抽运功率的变化关系。高抽运功率和低脉冲重复频率能有效增加激光介质的反转粒子数, 产生的基频调 Q 脉冲具有高的峰值功率和窄的脉冲宽度, 所以拉曼光的单脉冲能量随着抽运功率的增加而变大, 随着脉冲重复频率的增加而减小, 如图 5 所示; 而拉曼光的脉冲宽度则随着抽运功率的增加而减小, 随着脉冲重复频率的增加而增大, 如图 6 所示。当抽运功率为 6.8 W, 重复频率为 15 kHz 时可获得最大单脉冲能量为 74.4  $\mu$ J, 脉冲宽度为 13.2 ns, 计算可得出此时拉曼光的峰值功率为 5.6 kW。

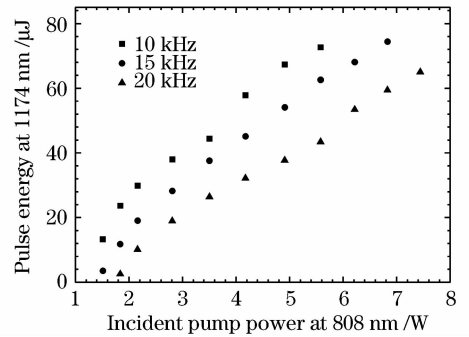


图 5 不同脉冲重复频率时拉曼光的单脉冲能量随抽运功率的变化

Fig. 5 Pulse energy of the Raman laser with respect to the incident pump power for different pulse repetition rates

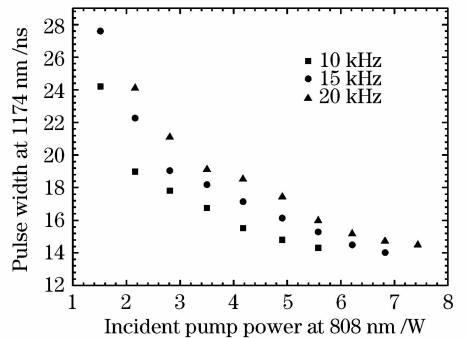


图 6 不同脉冲重复频率时拉曼光的脉冲宽度随抽运功率的变化

Fig. 6 Pulse width of the Raman laser with respect to the incident pump power for different pulse repetition rates

Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体还是一种优良的自拉曼晶体, 适合做全固态自拉曼激光器。Nd:GdVO<sub>4</sub> 自拉曼激光器由于可以少用一块晶体, 因而可以减少腔内的损耗, 并具有更小的腔长。分别对腔长为 95 mm 和 75 mm (最短腔长) 的 Nd:GdVO<sub>4</sub> 自拉曼激光器进行详细的实验研究, 并与 Nd:YAG/GdVO<sub>4</sub> 内腔式

表 1 Nd:YAG/GdVO<sub>4</sub>拉曼激光器和 Nd:GdVO<sub>4</sub>自拉曼激光器的实验结果比较  
Table 1 Comparison of experimental results between the Nd:YAG/GdVO<sub>4</sub> Raman laser and the Nd:GdVO<sub>4</sub> self-Raman laser

	Cavity length /mm	Average output power /mW	Optical-to-optical conversion efficiency /%
Nd:YAG/GdVO <sub>4</sub> Raman laser	95	1300	17.4
Nd:GdVO <sub>4</sub> self-Raman laser	95	984	13.2
Nd:GdVO <sub>4</sub> self-Raman laser	75	1056	14.2

拉曼激光器进行了比较,结果如表 1 所示。

可以看出,在相同的抽运功率和脉冲重复频率条件下 Nd:YAG/GdVO<sub>4</sub> 内腔式拉曼激光器的最大平均输出功率、单脉冲能量和转换效率均明显高于优化后的 Nd:GdVO<sub>4</sub> 自拉曼激光器。这是因为主动调 Q 内腔式 Nd:YAG/GdVO<sub>4</sub> 拉曼激光器将激光介质和拉曼介质分开,比 Nd:GdVO<sub>4</sub> 自拉曼激光器易于调节,有利于实现最佳化,因而获得了更高的拉曼输出功率和转换效率。

## 4 结 论

对 Nd:YAG/GdVO<sub>4</sub> 内腔拉曼激光器进行了实验研究,当抽运功率为 7.44 W,脉冲重复频率为 20 kHz 时,获得了平均功率为 1.3 W 的 1174 nm 一阶拉曼光,对应的光-光转换效率为 17.4%;当抽运功率为 6.8 W,脉冲重复频率为 15 kHz 时获得的最大单脉冲能量为 74.4 μJ,典型脉冲宽度为 13.2 ns。并对 Nd:YAG/GdVO<sub>4</sub> 内腔拉曼激光器与 Nd:GdVO<sub>4</sub> 自拉曼激光器进行了比较,结果表明在相同抽运功率和脉冲重复频率条件下 Nd:YAG/GdVO<sub>4</sub> 内腔式拉曼激光器可以获得更高的最大平均输出功率和转换效率。

## 参 考 文 献

- 1 H. M. Pask. The design and operation of solid-state Raman lasers [J]. *Progress in Quantum Electron.*, 2003, **27**(1):3~56
- 2 Jia Peng, Zhang Xingyu, Wang Qingpu *et al.*. Laser diode-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> self-stimulated Raman laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(10):1309~1313  
贾 鹏,张行愚,王青圃等. 激光二极管抽运的自拉曼 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器[J]. *中国激光*, 2006, **33**(10):1309~1313
- 3 P. Cerny, H. Jelinkova, P. G. Zverev, *et al.*. Solid state lasers with Raman frequency conversion [J]. *Progress in Quantum Electron.*, 2004, **28**(2):113~143

- 4 Liu Tianhong, Tan Huiming, Wang Baoshan *et al.*. Laser diode pumped actively Q-switched Nd:GdVO<sub>4</sub> self-stimulated Raman laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(12):1593~1596  
刘天红,檀慧明,王保山等. 激光二极管抽运主动调 Q Nd:GdVO<sub>4</sub> 自受激拉曼激光器[J]. *中国激光*, 2006, **33**(12):1593~1596
- 5 Su Fufang, Zhang Xingyu, Wang Qingpu *et al.*. Passively Q-switched Nd:GdVO<sub>4</sub> self-Raman laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(10):1831~1835  
苏富芳,张行愚,王青圃等. 被动调 Q 自拉曼 Nd:GdVO<sub>4</sub> 激光器[J]. *光学学报*, 2007, **27**(10):1831~1835
- 6 A. I. Zagumennyi, V. G. Ostroumov, I. A. Shcherbakov *et al.*. The Nd:GdVO<sub>4</sub> crystal; a new material for diode-pumped lasers [J]. *Sov. J. Quantum Electron.*, 1992, **22**(12):1071~1072
- 7 Junhai Liu, Bernd Ozygus, Suhui Yang *et al.*. Efficient passive Q-switching operation of a diode-pumped Nd:GdVO<sub>4</sub> laser with a Cr<sup>4+</sup>:YAG saturable absorber [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2003, **20**(4):652~661
- 8 C. Li, J. Song, D. Shen *et al.*. Diode-pumped passively Q-switched Nd:GdVO<sub>4</sub> lasers operating at 1.06 μm wavelength [J]. *Appl. Phys. B*, 2000, **70**(4):471~474
- 9 Jie Liu, Yonggang Wang, Wenmiao Tian *et al.*. Q-switched and mode-locked diode-pumped Nd:GdVO<sub>4</sub> laser with low temperature GaAs saturable absorber [J]. *Opt. Mater.*, 2006, **28**(8):970~973
- 10 C. Czeranowsky, M. Schmidt, E. Heumann *et al.*. Continuous wave diode pumped intracavity doubled Nd:GdVO<sub>4</sub> laser with 840 mW output power at 456 nm [J]. *Opt. Commun.*, 2002, **205**(5):361~365
- 11 Alexander A. Kaminskii, Ken-ichi Ueda, Hans J. Eichler *et al.*. Tetragonal vanadates YVO<sub>4</sub> and GdVO<sub>4</sub> - new efficient χ(3)-materials for Raman lasers [J]. *Opt. Commun.*, 2001, **194**:201~206
- 12 Y. F. Chen. Efficient 1521-nm Nd:GdVO<sub>4</sub> Raman laser [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(22):2632~2634
- 13 Y. F. Chen. Compact efficient self-frequency Raman conversion in diode-pumped passively Q-switched Nd:GdVO<sub>4</sub> laser [J]. *Appl. Phys. B*, 2004, **78**(6):685~687
- 14 T. T. Basiev, S. V. Vassiliev, V. A. Konjushkin *et al.*. Diode pumped 500-picosecond Nd:GdVO<sub>4</sub> Raman laser [J]. *Laser Phys. Lett.*, 2004, **1**(5):237~240
- 15 Fufang Su, Xingyu Zhang, Qingpu Wang *et al.*. Theoretical and experimental study on a diode-pumped actively Q-switched Nd:GdVO<sub>4</sub> self-stimulated Raman laser at 1173nm [J]. *Opt. Commun.*, 2007, **277**:379~384