

基于 BaWO₄ 晶体 332 cm⁻¹ 频移的拉曼激光器

孙文佳¹ 王青圃¹ 刘兆军^{1*} 张行愚¹ 王公堂² 白 芬¹ 兰伟霞¹ 万学斌¹ 张怀金³

¹ 山东大学信息科学与工程学院山东省激光工程与应用重点实验室, 山东 济南 250100
² 山东师范大学物理与微电子学院, 山东 济南 250014
³ 山东大学晶体材料国家重点实验室, 山东 济南 250100

摘要 通过 1064 nm 激光抽运 BaWO₄ 晶体的拉曼技术, 获得了 1103 nm 的拉曼光输出。尺寸 5 mm×5 mm×46 mm 的 BaWO₄ 晶体按 X(ZZ) \bar{X} 配置, 实现了 332 cm⁻¹ 频移的受激拉曼散射。在激光二极管抽运功率为 7.55 W, 声光 Q 开关工作频率为 17 kHz 的条件下, 获得平均功率为 1.23 W 的拉曼光输出, 光-光转换效率达到 16.3%。此时得到的拉曼光脉冲宽度为 27 ns, 相应的峰值功率为 2.6 kW。光束质量因子在两个正交方向上分别为 2.0±0.2 和 1.8±0.2。同时, 估算了此时 BaWO₄ 晶体的热透镜焦距, 其值为 -1100 mm。

关键词 非线性光学; 拉曼激光器; 受激拉曼散射; BaWO₄ 晶体

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0702006

A BaWO₄ Raman Laser with the Raman Shift of 332 cm⁻¹

Sun Wenjia¹ Wang Qingpu¹ Liu Zhaojun¹ Zhang Xingyu¹ Wang Gongtang²
Bai Fen¹ Lan Weixia¹ Wan Xuebin¹ Zhang Huaijin³

¹ Provincial Key Laboratory of Laser Technology and Application, School of Information Science & Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250100, China
² College of Physics and Electronics, Shandong Normal University, Jinan, Shandong 250014, China
³ Institute of Crystal Materials, Shandong University, Jinan, Shandong 250100, China

Abstract A 1103-nm BaWO₄ Raman laser is demonstrated with a 1064 nm pump laser. A 5 mm×5 mm×46 mm BaWO₄ crystal with scattering geometry X(ZZ) \bar{X} configuration is employed as the active medium and its 332 cm⁻¹ Raman mode is accomplished. At an incident pump power of 7.55 W, the first-Stokes power of 1.23 W at 1103.2 nm is obtained at a repetition rate of 17 kHz, corresponding to an optical-to-optical conversion efficiency of 16.3%. The pulse width of Raman laser is measured to be 27 ns and the peak power is 2.6 kW. The beam quality factors M^2 in the two orthogonal directions are 2.0±0.2 and 1.8±0.2, respectively. The thermal focal length of the BaWO₄ crystal is estimated to be -1100 mm under this condition.

Key words nonlinear optics; Raman laser; stimulated Raman scattering; BaWO₄ crystal

OCIS codes 190.0190; 140.3550; 140.3540; 160.4330

1 引 言

受激拉曼散射是实现频率变换、产生新波长的一种有效方式^[1~5]。与气体和液体拉曼介质相比, 固体拉曼介质具有增益高、热传导性好、机械特性好、易于与全固态激光技术相结合的优点。因此, 以晶体作为拉曼增益介质的固体受激拉曼激光器以其

结构紧凑、效率高、稳定性好等优点, 在交通、测量、生物医学、信息科技、国防工业等领域都有广泛的应用。目前, 报道的重要拉曼晶体有硝酸钡 [Ba(NO₃)₂]^[6,7]、钼酸盐类 (SrMoO₄, PbMoO₄)^[8,9]、钒酸盐类 (YVO₄, GdVO₄)^[10,11] 以及钨酸盐类 [KGd(WO₄)₂, KLu(WO₄)₂, BaWO₄]^[12~14] 等。

收稿日期: 2011-03-01; 收到修改稿日期: 2011-03-18

基金项目: 国家自然科学基金(60908010)资助课题。

作者简介: 孙文佳(1983—), 女, 博士研究生, 主要从事激光物理与技术等方面的研究。E-mail: swj924@163.com

导师简介: 王青圃(1942—), 男, 博士生导师, 主要从事激光物理与技术等方面的研究。E-mail: qpwang@sdu.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: zhaojunliu@sdu.edu.cn

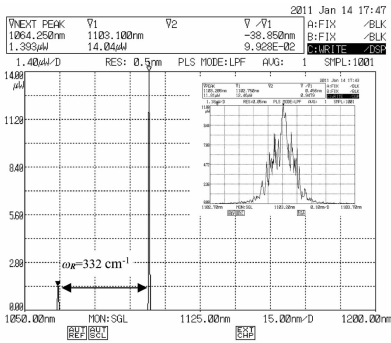


图3 基频光与拉曼光的光谱图。插图为拉曼光谱的精细测量结果

Fig.3 Optical spectra of the fundamental and Raman lasers with the frequency shift shown. Inset is the fine measurement result of Raman spectrum

未发现高阶斯托克斯光和反斯托克斯光。由图3测量结果可得，拉曼光相对基频光的受激拉曼散射频移为332 cm⁻¹，对应于 WO₄²⁻ 离子团的弯曲振动模，与文献[20]报道一致。由于众多研究者都更关注于 BaWO₄ 晶体的925 cm⁻¹拉曼频移，而且要实现1103 nm而非1180 nm的拉曼光输出，对输出镜的镀膜要求比较高，基于以往研究拉曼激光器的经验，设计了合适的腔镜镀膜，实现了基于 BaWO₄ 晶体 332 cm⁻¹拉曼频移的拉曼光输出。

拉曼激光的输出功率用 EPM2000 功率计测量，17 kHz情况下的测量结果如图4所示。图4给出了总输出功率、基频光功率和拉曼光功率随抽运功率的变化关系。由于从输出镜输出的激光既包含拉曼光，也有一小部分基频光，所以用一片带通滤波器(BPF)把基频光和拉曼光分开。在300~1200 nm波段范围中，该滤波器仅对1061.5~1066.5 nm波

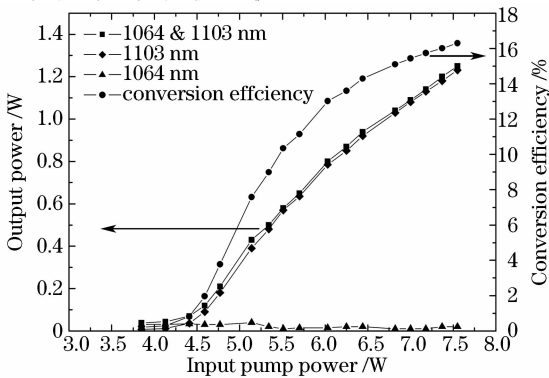


图4 17 kHz时基频光、拉曼光、总输出功率和拉曼光转换效率随输入抽运功率的变化曲线

Fig.4 Average output power for 1064,1103 nm and total lasers, and Raman conversion efficiency at 17 kHz with respect to the input pump power

段有 97% 的透射率，对其他波长均高反 ($R > 99.8\%$)。所以分别测得基频光功率、总输出功率之后，可以得到拉曼光功率。当输入抽运光功率为 7.55 W 时，拉曼光输出功率为 1.23 W，由 LD 到拉曼光的转换效率为 16.3%。此时的斜率效率为 33.2%。图中实心圆曲线代表的是拉曼光的转换效率。可见，随着总输出功率的增加，基频光功率占总功率的比重逐渐下降，且拉曼光的功率值近似等于总输出功率值。由于输出镜对基频光 1064 nm 高反 ($R > 99.8\%$)，大大增强了腔内的基频光功率密度，从而提高了拉曼光的转换效率。

图5给出了 14, 17, 20 kHz 情况下不同抽运功率时的拉曼光输出功率。由图5可见，当脉冲重复频率为 17 kHz 时，可得到最高拉曼光输出功率，即上文提到的 1.23 W。另外，可以明显看出拉曼激光器的起振阈值随脉冲重复频率的不同而变化，较低的脉冲重复频率对应较低的拉曼振荡阈值。例如，在 14 kHz 时，拉曼激光器阈值低于 3.6 W，而在 20 kHz 时，阈值高于 4.4 W。低抽运功率时，14 kHz 时的输出拉曼光功率远大于其他重复频率时的功率，但随着抽运功率的逐渐增长，14 kHz 时的输出拉曼光功率增长逐渐缓慢，接近饱和。这是由于腔内高功率密度引起的拉曼介质的自聚焦效应造成的^[17]。为了避免损伤晶体，在 14 kHz 的条件下，抽运功率没有超过 6.9 W。在 17 kHz 和 20 kHz 的条件下，当抽运功率超过 7.55 W，频移为 925 cm⁻¹ 时的 1180 nm 的拉曼激光也同时出现，所以没有继续增加抽运功率。

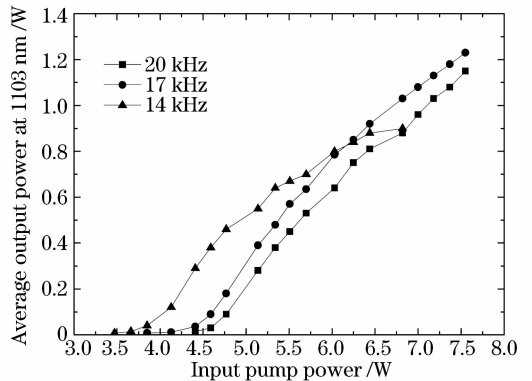


图5 不同脉冲重复频率下拉曼光输出功率随抽运功率的变化

Fig.5 Output power of 1103 nm laser versus input pump power at different repetition rates

对输出激光的时间特性进行了研究。测量时，先用带通滤波器分光，然后用快速响应 pin 管探测，并

由数字存储示波器(TDS 5052B, Tektronix)记录。

通过示波器记录的脉冲形状,得出不同抽运功率、不同脉冲重复频率下的脉冲宽度,结果如图6所示。为了比较,给出了17 kHz时的基频光脉冲宽度。由图可以看出,在重复频率一定的情况下,输出激光的脉冲宽度随抽运功率的增加而减小。抽运功率为7.55 W,脉冲重复频率为17 kHz时,拉曼光脉冲宽度为27 ns,基频光宽度为41 ns,典型的脉冲形状如图7所示。另外可以计算出拉曼光峰值功率为2.6 kW。

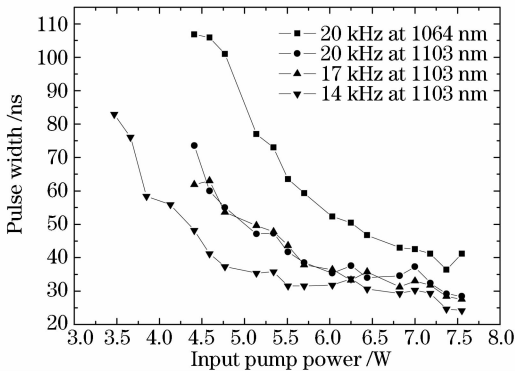


图6 不同重复频率下脉宽随抽运功率的变化
Fig. 6 Pulse widths versus input pump power at different repetition rates

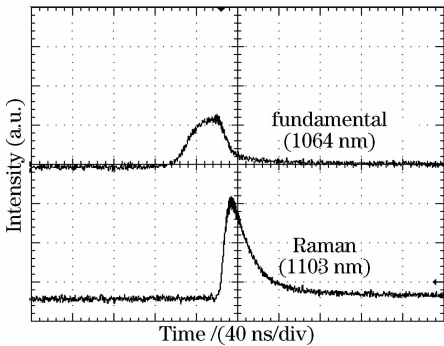


图7 基频光和拉曼光的典型脉冲形状图
Fig. 7 Typical pulse shapes of the fundamental and Raman lasers at the repetition rate of 17 kHz

拉曼光首先经过一系列衰减,然后通过一个焦距为50 mm的聚焦透镜会聚,再用CCD测量会聚后不同位置的光斑大小,采用二项式拟合的方法,最终测得拉曼光的光束质量因子。在抽运功率为7.55 W,脉冲重复频率为17 kHz的情况下,测量了1103 nm拉曼光的光束质量。其水平和垂直方向的光束质量因子分别为 2.0 ± 0.2 和 1.8 ± 0.2 。热负载会引起Nd:YAG介质的各向异性,因此Nd:YAG棒在两个方向上的热透镜焦距不同,导致了在两个方向上的光束质量因子有差异。

估算了拉曼输出功率为最高时的BaWO₄等效热透镜焦距。首先撤去聚焦透镜,测量不同位置处的光斑大小,通过自由空间光传输方程^[21]

$$\omega^2(z) = \omega_0^2 + \left(\frac{M^2 \lambda}{\pi \omega_0}\right)^2 \times (z - z_0)^2 \quad (1)$$

便可算出输出镜上的光斑大小 ω_0 。式中 λ 为波长, M^2 为光束质量因子, z_0 为光波传输方向上束腰的位置, ω_0 为束腰光斑, $\omega(z)$ 为距输出镜位置 z 处的光斑大小。

其次,根据计算出的 ω_0 值,用ABCD矩阵反推BaWO₄热透镜焦距(f_{BaWO_4})。

Nd:YAG的热透镜焦距(f_{YAG})表示为^[22]

$$f_{\text{YAG}} = \frac{\omega_{\text{LD}}^2}{4A_0} \left[1 + 2 \left(\frac{\omega_{\text{plc}}}{\omega_{\text{LD}}} \right)^2 \right], \quad (2)$$

式中 A_0 是一个与抽运功率有关的量,具体定义为

$$A_0 = \frac{\eta_h P_{\text{abs}}}{4\pi K} \left[\frac{\partial n}{\partial T} + (n-1)(1+\nu)\alpha_T + 2C_r n^3 \alpha_T \right], \quad (3)$$

ω_{LD} 为LD在Nd:YAG中的平均抽运半径, ω_{plc} 为基频光在Nd:YAG中的平均光斑半径, η_h 为吸收的抽运光功率转换为热的比例, P_{abs} 为激光晶体吸收的抽运光功率, K 为热导率, $\partial n/\partial T$ 为折射率的热光系数, n 为激光晶体的折射率, ν 为泊松比, α_T 为热膨胀系数, C_r 为光弹系数,具体取值见文献[23]。依据测得的 ω_0 值,再通过多次运算,可以得到自洽的 ω_{plc} , f_{YAG} , f_{BaWO_4} 的取值。在抽运功率为7.55 W,脉冲重复频率为17 kHz的情况下,估算出的BaWO₄热透镜焦距约为-1100 mm。

4 结 论

报道了一种基于BaWO₄晶体的拉曼激光器。在1064 nm纳秒脉冲抽运条件下,选用拉曼频移为 332 cm^{-1} 的BaWO₄晶体作为拉曼介质,产生了波长为1103 nm的激光。在抽运功率为7.55 W,脉冲重复频率为17 kHz的条件下,获得最高的拉曼光功率为1.23 W,相应的由LD到拉曼光的转换效率为16.3%,BaWO₄热透镜焦距约为-1100 mm。

参 考 文 献

- 1 H. M. Pask. The design and operation of solid-state Raman lasers [J]. *Prog. Quantum Electron.*, 2003, **27**(1): 3~56
- 2 Liu Bangqun, Gao Hui, Liu Zuyin. Stimulated Raman scattering and stimulated four photon mixing in Er doped silica fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 1998, **A25**(1): 61~64
刘邦群,高 晖,刘祖荫. 掺铒石英光纤中的受激拉曼散射及受激四光子混频[J]. *中国激光*, 1998, **A25**(1): 61~64
- 3 T. T. Basiev, S. V. Vassiliev, V. A. Konjushkin *et al.*. Diode

- pumped 500-picosecond Nd : GdVO₄ Raman laser [J]. *Laser Phys. Lett.*, 2004, **1**(5):237~240
- 4 Z. J. Liu, Q. P. Wang, X. Y. Zhang *et al.*. A diode side-pumped KTiOAsO₄ Raman laser [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(9):6968~6974
 - 5 Z. J. Liu, Q. P. Wang, X. Y. Zhang *et al.*. 1120 nm second-Stokes generation in KTiOAsO₄[J]. *Laser Phys. Lett.*, 2009, **6**(2):121~124
 - 6 C. He, T. H. Chyba. Solid-state barium nitrate Raman laser in the visible region [J]. *Opt. Commun.*, 1997, **135**(4-6):273~278
 - 7 P. G. Zverev, J. T. Murray, R. C. Powell *et al.*. Stimulated Raman scattering of picosecond pulses in barium nitrate crystals [J]. *Opt. Commun.*, 1993, **97**(1-2):59~64
 - 8 T. T. Basiev, S. V. Vassiliev, M. E. Doroshenko *et al.*. Laser and self-Raman-laser oscillations of PbMoO₄:Nd³⁺ crystal under laser diode pumping [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(1):65~67
 - 9 P. G. Zverev, A. Y. Karasik, T. T. Basiev *et al.*. Stimulated Raman scattering of picosecond pulses in SrMoO₄ and Ca₃(VO₄)₂ crystals [J]. *Quantum Electron.*, 2003, **33**(4):331~334
 - 10 F. F. Su, X. Y. Zhang, Q. P. Wang *et al.*. Diode pumped actively Q-switched Nd : YVO₄ self-Raman laser [J]. *J. Phys. D*, 2006, **39**(10):2090~2093
 - 11 Hu Dawei, Wang Zhengping, Zhang Huaijin *et al.*. Stimulated Raman scattering of GdVO₄ crystal [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(1):11~16
胡大伟,王正平,张怀金等. GdVO₄ 晶体的受激拉曼散射[J]. *中国激光*, 2008, **35**(1):11~16
 - 12 T. Omatsu, Y. Ojima, H. M. Pask *et al.*. Efficient 1181nm self-stimulating Raman output from transversely diode-pumped Nd³⁺:KGd(WO₄)₂ laser [J]. *Opt. Commun.*, 2004, **232**(1-6):327~331
 - 13 J. H. Liu, U. Griebner, V. Petrov *et al.*. Efficient continuous-wave and Q-switched operation of a diode-pumped Yb : KLu (WO₄)₂ laser with self-Raman conversion [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(18):2427~2429
 - 14 Wang Zhengping, Zhang Huaijin, Xu Xinguang *et al.*. Stimulated Raman scattering of BaWO₄ crystal [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(12):1428
王正平,张怀金,许心光等. BaWO₄ 晶体的受激拉曼散射[J]. *中国激光*, 2004, **31**(12):1428
 - 15 P. Černý, H. Jelinková, P. G. Zverev *et al.*. Solid state lasers with Raman frequency conversion [J]. *Prog. Quantum Electron.*, 2004, **28**(2):113~143
 - 16 A. J. Lee, H. M. Pask, J. A. Pipe *et al.*. An intracavity, frequency-doubled BaWO₄ Raman laser generating multi-watt continuous-wave, yellow emission [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(6):5984~5992
 - 17 Y. F. Chen, K. W. Su, H. J. Zhang *et al.*. Efficient diode-pumped actively Q-switched Nd:YAG/BaWO₄ intracavity Raman laser [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(24):3335~3337
 - 18 Nan Zong, Qian-jin Cui, Qing-lei Ma *et al.*. High average power 1.5 μm eye-safe Raman shifting in BaWO₄ crystals [J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(1):7~10
 - 19 S. T. Li, X. Y. Zhang, Q. P. Wang *et al.*. Diode-side-pumped intracavity frequency-doubled Nd : YAG/BaWO₄ Raman laser generating average output power of 3.14 W at 590 nm [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(20):2951~2953
 - 20 T. T. Basiev, A. A. Sobol, Y. K. Voronko *et al.*. Spontaneous Raman spectroscopy of tungstate and molybdate crystals for Raman lasers [J]. *Opt. Mater.*, 2000, **15**(3):205~216
 - 21 N. Reng, B. Eppich. Definition and measurements of high power laser beam parameters [J]. *Opt. Quantum Electron.*, 1992, **24**(9):973~992
 - 22 S. Z. Fan, X. Y. Zhang, Q. P. Wang *et al.*. More precise determination of thermal lens focal length for end-pumped solid-state lasers [J]. *Opt. Commun.*, 2006, **266**(2):620~626
 - 23 H. Glur, R. Lavi, T. Graf. Reduction of thermally induced lenses in Nd : YAG with low temperatures [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2004, **40**(5):499~504