

文章编号: 0258-7025(2006)12-1593-04

激光二极管抽运主动调Q Nd:GdVO₄自受激拉曼激光器

刘天红^{1,2}, 檀慧明¹, 王保山^{1,2}, 彭继迎^{1,2}, 苗杰光^{1,2}

(¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130022; ² 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 采用激光二极管(LD)抽运、主动调Q的方式,利用c向切割的Nd:GdVO₄晶体的自受激拉曼散射(self-SRS)效应,实现了结构紧凑、高效的脉冲拉曼激光器。在输入功率为1.8 W,主动调Q 10 kHz时,自受激拉曼激光器产生了稳定的1176 nm的斯托克斯(Stokes)脉冲光,斯托克斯光的单脉冲能量为10 μJ,脉冲宽度为19 ns。此时,自受激拉曼散射的阈值仅为510 mW,斯托克斯光的转换效率为5.6%。实验结果表明,有效的自受激拉曼变频可以通过一个c向切割的Nd:GdVO₄晶体,采用主动调Q的方式来实现。

关键词 非线性光学;拉曼激光器;自受激拉曼散射;主动调Q

中图分类号 TN 248.1 **文献标识码** A

Laser Diode Pumped Actively Q-Switched Nd:GdVO₄ Self-Stimulated Raman Laser

LIU Tian-hong^{1,2}, TAN Hui-ming¹, WANG Bao-shan^{1,2},
PENG Ji-ying^{1,2}, MIAO Jie-guang^{1,2}

¹Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
The Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130022, China
²Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Abstract Generation of compact and efficient self-stimulated Raman pulses by a laser diode (LD) pumped actively Q-switched c-cut Nd:GdVO₄ laser is demonstrated. At 1.8 W incident pump power, the self-stimulated Raman laser produces stable 19 ns pulses at a Stokes wavelength of 1176 nm with 10 μJ pulse energy at 10 kHz repetition rate. The threshold of the self-stimulated Raman laser is 510 mW, the conversion efficiency from the diode pump to the Stokes is 5.6%. Experimental results reveal that efficient self-stimulated Raman conversion frequency can be achieved with a c-cut Nd:GdVO₄ crystal and actively Q-switched.

Key words nonlinear optics; Raman laser; self-stimulated Raman scattering; actively Q-switched

1 引言

受激拉曼散射(SRS)^[1~3]是一种拓展激光光谱范围的十分有效的方法,人们很早就对不同拉曼频移介质(如:气体、液体、固体等)的受激拉曼散射现象进行了广泛而深入的研究。由于受激拉曼散射是一种三阶非线性效应,阈值高(一般大于

10 MW/cm²),所以一般的拉曼激光器抽运功率高,设备庞大。激光二极管(LD)抽运的全固态激光器(如Nd:YAG,Nd:YVO₄,Nd:GdVO₄等)具有效率高、结构紧凑等优点,因而成为中低功率激光器的主流。同时新的性能优良的拉曼频移晶体(如LiIO₃,Ba(NO₃)₂,KGW)的发明,进一步推动了受激拉曼散射的研究。将激光二极管抽运的全固态激光器与

收稿日期:2005-12-29;收到修改稿日期:2006-07-04

作者简介:刘天红(1975—),女,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所硕士研究生,主要从事全固态激光器的研究。
E-mail:lthqiao@sohu.com

导师简介:檀慧明(1954—),男,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研究员,博士生导师,主要从事光机电一体化方面的研究。E-mail:lasersales@cni-photon.net

性能优良的拉曼频移晶体结合起来,实现结构紧凑、高效率、全固态的拉曼激光器,已成为近年来拉曼激光器新的发展方向。而其中有些拉曼频移晶体(如 KGW 等)本身可以掺入 Nd^{3+} 而成为激光晶体,这样就可以在晶体自身内实现自受激拉曼散射(Self-SRS)^[4~6]。这种结构将更有利于实现基频光和斯托克斯(Stokes)光的模式匹配,降低阈值,提高系统的稳定性和转换效率,简化腔型结构。

$\text{Nd}:\text{GdVO}_4$ 和 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 属于四方晶系,具有锆英石型结构,空间群为 $D_{4h}^{19}-I4_1/\text{amd}$, 它们作为激光晶体的优良性能已经得到材料及激光专家的高度评价。1999 年, A. A. Kaminskii 等^[7] 报道了 YVO_4 和 GdVO_4 晶体的拉曼散射效应,其最强的拉曼振动模分别为 890 cm^{-1} 和 882 cm^{-1} , 增益均为 4.5 cm/GW 左右,因此利用 $\text{Nd}:\text{GdVO}_4$ 或 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 晶体实现自受激拉曼散射具有重要的理论和现实意义。四方晶系的对称轴为 c 轴,与 c 轴垂直的分别为 a 轴和 b 轴。由于晶体场的影响, $\text{Nd}:\text{GdVO}_4$ 或 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 的发射谱具有明显的偏振特征和不同的发射截面。以 $1.06\text{ }\mu\text{m}$ 谱线为例,在 $\text{Nd}:\text{GdVO}_4$ 晶体里平行于 c 轴的发射截面 $\sigma_{\parallel} = 7.6 \times 10^{-19}\text{ cm}^2$,垂直于 c 轴的发射截面 $\sigma_{\perp} = 1.2 \times 10^{-19}\text{ cm}^2$, σ_{\parallel} 是 σ_{\perp} 的 5 倍多^[8]。因此一般连续激光器的激光晶体均为 a 向切割,这样有利于降低阈值、提高转换效率。但是对于要获得高峰值功率的脉冲激光器而言,小的发射截面更有利于激光晶体的储能,因而也更易获得高的峰值功率^[9,10]。这一点对于需要很高激光功率密度的受激拉曼散射而言尤为重要。而 a 向和 c 向的拉曼振动模增益相差不大,因此利用 c 向切割 $\text{Nd}:\text{GdVO}_4$ 晶体实现的自受激拉曼散射可以获得低阈值、高效率的一阶斯托克斯光。

2 一阶斯托克斯(1176 nm)激光输出

采用简单直腔结构如图 1 所示。2 W 的波长为 808 nm 的激光二极管经过光学耦合系统(OC: Optics Coupler)进行准直、扩束、圆化后再聚焦注入 $\text{Nd}:\text{GdVO}_4$ 晶体,最大输出功率为 1.8 W。实验用的 $\text{Nd}:\text{GdVO}_4$ 晶体为 c 向切割,尺寸为 $3\text{ mm} \times 3\text{ mm} \times 5\text{ mm}$,摩尔分数为 0.5%。晶体端面靠近激光二极管端双色镀膜 HT@808 nm, AR@1064 nm & 1176 nm,另一端镀 AR@1064 nm & 1176 nm。声光调 Q 器(A/O Q-switch)晶体为重火石玻璃,宽

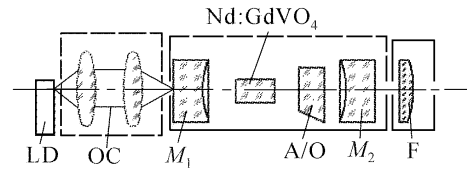


图 1 激光二极管抽运主动调 Q 拉曼激光器结构图

Fig. 1 Schematic of the LD-pumped actively Q-switched Raman laser

24 mm,两端均镀 AR@1064 nm ($R < 0.5\%$), A/O 脉冲上升及下降时间均小于 10 ns。平凹输入镜 M_1 曲率半径 $R_1 = 200\text{ mm}$,平面镀 AR@808 nm,凹面镀双色膜 HR@1064 nm & 1176 nm ($R > 99.8\%$), HT@808 nm ($T > 95\%$); 耦合输出镜 M_2 曲率半径 $R_2 = 50\text{ mm}$,凹面 HR@1064 nm ($R > 99.8\%$),对 1176 nm 透过率 $T = 2\%$,平面镀 AR@1064 nm & 1176 nm。限于机械架结构,腔长为 40 mm,抽运光斑半径为 $100\text{ }\mu\text{m}$ 。

很多文献^[11]都论述了固体激光器的热透镜效应,拉曼激光器的热透镜效应与之相似。拉曼激光器的热效应除了抽运光与基频光的量子亏损外还来源于受激拉曼散射过程中基频光与斯托克斯光的光子能量差,总的拉曼热功率可表示为^[11]

$$P_{\text{heat}} = P_{\text{Sl}} [(\lambda_{\text{Sl}}/\lambda_L) - 1], \quad (1)$$

式中 P_{Sl} 为一阶斯托克斯光的功率; $\lambda_L, \lambda_{\text{Sl}}$ 分别为基频光和一阶斯托克斯光的波长。

传统的固体激光器热效应产生于端面,而拉曼激光器的热效应产生于所有发生受激拉曼散射效应的地方,也就是基频光通过拉曼晶体的整个长度 (l) 内。由于基频光为高斯光束,仅考虑晶体的热光效应 (dn/dT) 对热透镜的影响,由受激拉曼散射引起的拉曼晶体热透镜可以表示为^[11]

$$\frac{1}{f_s} = \left(\frac{dn}{dT} \right) \frac{1}{k_c} \frac{P_{\text{Sl}}}{\pi \omega_{\text{Sl}}^2} \left(\frac{\lambda_{\text{Sl}}}{\lambda_L} - 1 \right), \quad (2)$$

式中 k_c 为晶体的热导率; dn/dT 为晶体的热光系数; ω_{Sl} 为斯托克斯光的束腰半径。

显然,晶体的热透镜效应随斯托克斯光功率的增加而变大,而热透镜焦距的变化又反过来影响基频光光束及斯托克斯光束,从而影响受激拉曼散射的效率。再考虑 $\text{Nd}:\text{GdVO}_4$ 作为激光晶体,激光二极管抽运在端面产生热透镜效应^[11],总的热透镜效应比较复杂。由于 $\text{Nd}:\text{GdVO}_4$ 晶体既是激光晶体又是拉曼频移晶体,所以由于量子亏损等原因引起的热沉要比一般的激光器大得多,热透镜效应也大得多。

在不计腔内无用损耗时,可以利用公式

$$R_1 R_2 \exp(2g_R I_L l) \geq 1 \quad (3)$$

计算受激拉曼散射的阈值。式中 R_1, R_2 分别为谐振腔对 1176 nm 的反射率; g_R 为拉曼晶体的增益系数; I_L 为基频光的功率密度; l 为拉曼晶体的长度; 受激拉曼散射的阈值 $I_{th} > 5 \text{ MW/cm}^2$ 。

图 2 为不同重复频率时的斯托克斯光功率和受激拉曼散射的阈值(产生斯托克斯光时,激光二极管的输入功率)。可见在重复频率为 10 kHz 时斯托克斯光功率最大达到 101.1 mW, 受激拉曼散射阈值仅为 500 mW 左右。由于拉曼增益强烈地依赖于基频光脉冲的峰值功率,所以受激拉曼散射的阈值随着重复频率的增加而逐渐增大,在重复频率为 5 kHz 时最低阈值不到 400 mW,即使在 40 kHz 时阈值也不到 850 mW。可见,采用 c 向切割 Nd:GdVO₄ 晶体,利用其自受激拉曼散射效应,阈值可以降低得很

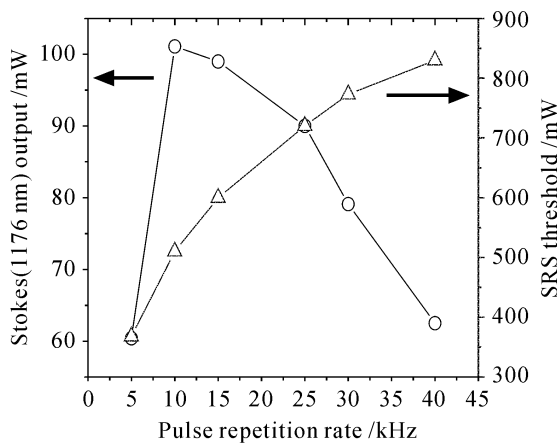


图 2 斯托克斯光功率和受激拉曼散射阈值随不同调制频率的变化曲线

Fig. 2 Effect of the pulse repetition rate on the Stokes power and the SRS threshold

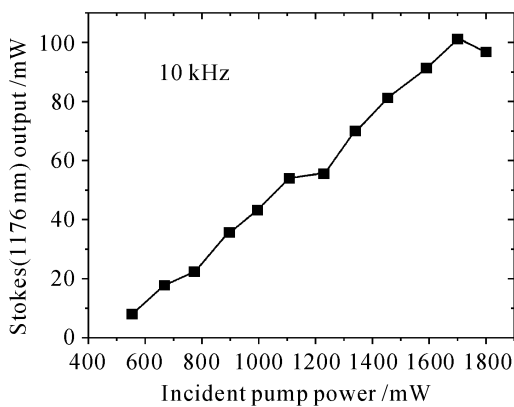


图 3 斯托克斯光功率随激光二极管不同输入功率的变化曲线

Fig. 3 Stokes (1176 nm) output versus incident LD pump power

低。图 3 为 10 kHz 时斯托克斯光功率随抽运功率的变化曲线。

图 4 是采用美国 Photon 公司生产的光束轮廓仪记录的激光远场光斑照片,光斑椭圆度为 0.98, $M^2 < 1.2$,光斑质量很高。

图 5 为利用分辨率小于 0.1 nm 的光纤光谱仪测得的基频光和斯托克斯光光谱。可见,一阶斯托克斯光(1175.6 nm)为 1065.1 nm^[12],频移 883 cm⁻¹。

图 6 记录了输入功率 1.8 W,主动调 Q 10 kHz

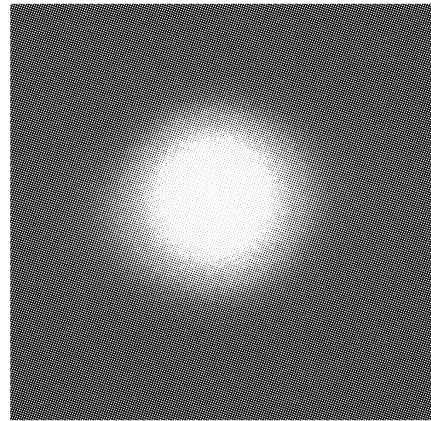


图 4 1176 nm 斯托克斯光束横模的功率空间分布

Fig. 4 Beam shape of 1176 nm Stokes laser

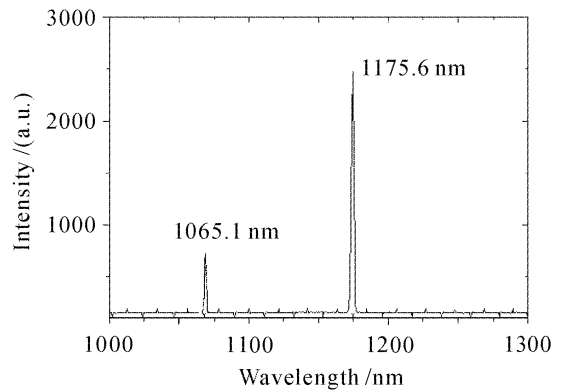


图 5 主动调 Q 自受激拉曼输出光谱

Fig. 5 Optical spectrum for the actively Q-switched self-stimulated Raman output

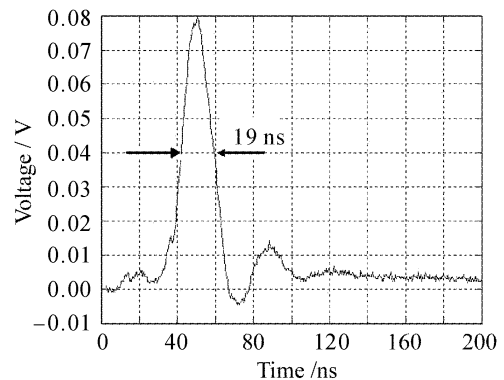


图 6 示波器记录的拉曼脉冲图

Fig. 6 Typical oscilloscope trace for the Raman pulse

时斯托克斯光的脉冲图。

3 结果与讨论

在输入功率为 1.8 W, 主动调 Q 10 kHz 时, 自受激拉曼激光器产生了稳定的 1176 nm 的斯托克斯脉冲光, 斯托克斯光的单脉冲能量为 10 μ J, 脉冲宽度为 19 ns。此时, 自受激拉曼散射的阈值仅为 510 mW, 斯托克斯光的转换效率为 5.6%。实验结果表明, 有效的自受激拉曼变频可以通过一个 c 向切割的 Nd:GdVO₄ 晶体, 采用主动调 Q 的方式来实现。

在实验时发现 Nd:GdVO₄ 晶体的热功率非常大, 这是由于在同一晶体内发生了激光和受激拉曼散射的量子亏损而产生大量热的缘故。众所周知, 拉曼谱线线宽随温度的升高而加宽, 从而导致拉曼增益系数降低; 另外大量的热沉也会使晶体产生很强的热透镜效应, 从而导致光束质量变坏。可见, 晶体产生大量的热是影响大功率斯托克斯光功率及受激拉曼散射转换效率的一个主要因素。

参 考 文 献

- Zhang Minming, Liu Deming, Wang Ying *et al.*. Single-stage fiber Raman lasers for pumping fiber Raman amplifiers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(12):1634~1638
张敏明, 刘德明, 王 英 等. 用于光纤拉曼放大器抽运源的单级光纤拉曼激光器[J]. 光学学报, 2005, **25**(12):1634~1638
- Ye Zhenhuan, Lou Qihong, Dong Jingxing *et al.*. Harmonic solid laser pumped multi-wavelength Raman lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(8):903~906
叶震寰, 楼祺洪, 董景星 等. 固体谐波多波长拉曼激光器[J]. 中国激光, 2004, **31**(8):903~906
- Shang Zhongjin, Chun Yuanfeng, Yong Xingjin *et al.*. Research on Raman spectrum in liquid core optical fiber of CCl₄ solution [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(11):666~670
- Y. B. Band, J. R. Ackerhalt, J. S. Krasinski *et al.*. Intracavity Raman lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1989, **25**(2):208~213
- J. C. van den Heuvel, F. J. M. van Putten, R. J. L. Lerou. The stimulated Raman scattering threshold for a nondiffraction-limited pump beam [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1992, **28**(9):1930~1936
- Takashige Omatsu, Helen M. Pask, James A. Piper *et al.*. Efficient 1181 nm self-stimulating Raman output from transversely diode-pumped Nd³⁺:KGd(WO₄) laser [C]. Conference on Lasers and Electro-Optics Europe, 2004. 62
- Alexander A. Kaminskii, Ken-ichi Ueda, Hans J. Eichler *et al.*. Tetragonal vanadates YVO₄ and GdVO₄—new efficient $\chi^{(3)}$ -materials for Raman lasers [J]. *Opt. Commun.*, 2001, **194**(1-3):201~206
- Y. F. Chen. Efficient subnanosecond diode-pumped passively Q-switched Nd:YVO₄ self-stimulated Raman laser [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(11):1251~1253
- A. S. Grabtchikov, A. N. Kuzmin, V. A. Lisinetskii *et al.*. All solid-state diode-pumped Raman laser with self-frequency conversion [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, **75**(24):3742~3744
- Tasoltan T. Basiev, Richard C. Powell. Introduction [J]. *Optical Materials*, 1999, **11**(4):301~306
- H. M. Pask. The design and operation of solid-state Raman lasers [J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2003, **27**(1):3~56
- Y. F. Chen. Compact efficient self-frequency Raman conversion in diode-pumped passively Q-switched Nd:GdVO₄ laser [J]. *Appl. Phys. B*, 2004, **78**(6):685~687