

# LD 抽运 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 被动调 Q *c*-cut $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 自拉曼激光器

刘永纳<sup>1</sup> 江飞虹<sup>2</sup> 王淑梅<sup>1</sup> 王美芹<sup>1</sup> 奚坤<sup>1</sup> 丁双红<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>烟台大学光电信息科学技术学院, 山东 烟台 264005)  
<sup>2</sup>烟台大学工程实训中心, 山东 烟台 264005)

**摘要** 对激光二极管(LD)抽运的  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  被动调 Q *c*-cut  $\text{Nd}:\text{YVO}_4$  自拉曼激光器进行了实验研究。通过采用不同初始透射率的  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  和不同反射率的输出镜进行实验,研究了初始透射率和反射率对拉曼光输出特性的影响。测量了拉曼光的平均输出功率、脉冲重复频率和脉冲宽度随抽运功率的变化。在抽运功率为 4.8 W 时,拉曼光的最高平均功率为 370 mW,相应的光-光转换效率为 7.7%。实验中得到了亚纳秒级的拉曼光输出,最高单脉冲能量为 54  $\mu\text{J}$ ,最高峰值功率为 47 kW。

**关键词** 激光器;激光二极管抽运;自拉曼激光器;被动调 Q; $\text{Nd}:\text{YVO}_4$  晶体; $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  晶体

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0702004

## LD-Pumped Passively Q-Switched *c*-cut $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ Self-Raman Laser with $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$

Liu Yongna<sup>1</sup> Jiang Feihong<sup>2</sup> Wang Shumei<sup>1</sup> Wang Meiqin<sup>1</sup> Xi Kun<sup>1</sup> Ding Shuanghong<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>Institute of Opto-Electronic Information, Yantai University, Yantai, Shandong 264005, China)  
<sup>2</sup>Engineering Training Center, Yantai University, Yantai, Shandong 264005, China)

**Abstract** The laser-diode (LD)-pumped passively Q-switched *c*-cut  $\text{Nd}:\text{YVO}_4$  self-Raman laser in which  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  crystal is taken as saturable absorber is investigated experimentally. By using  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  crystals with different initial transmissions and output couplers with different reflectivities at Raman laser in the experiment, the influences of the initial transmission and reflectivity on output characteristics of Raman laser are studied. The average output power, pulse repetition frequency and pulse width of Raman laser with respect to the pumped power are measured. The obtained maximum output average power of Raman laser is 370 mW at 4.8 W of pumped power and the corresponding conversion efficiency is 7.7%. The self-Raman laser can produce pulses in the sub nanosecond level, and the maximum single pulse energy and peak power are 54  $\mu\text{J}$  and 47 kW, respectively.

**Key words** lasers; laser diode pumping; self-Raman laser; passively Q-switched;  $\text{Nd}:\text{YVO}_4$  crystal;  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  crystal

**OCIS codes** 140.3480; 140.3540; 140.3550; 140.3580

## 1 引 言

受激拉曼散射(SRS)是重要的频率变换技术之一,散射光的光谱可以从紫外到红外区域,大大拓展了激光光谱范围。调 Q 能得到高功率的窄脉

冲输出,在激光测距、激光医疗、遥感、激光定标、激光雷达等领域有着重要的应用。调 Q 脉冲输出可以通过主动调 Q 和被动调 Q 实现,主动调 Q 是在腔内加入庞大的声光或者电光调 Q 器件并在腔外使用驱

收稿日期: 2012-02-22; 收到修改稿日期: 2012-03-19

基金项目: 国家自然科学基金(10974168)和山东省高校科技计划项目(J09LA06)资助课题。

作者简介: 刘永纳(1985—),女,硕士研究生,主要从事固体激光器方面的研究。E-mail: yongnaliu@126.com

导师简介: 丁双红(1970—),女,博士,副教授,主要从事激光物理与技术等方面的研究。

E-mail: shding@ytu.edu.cn(通信联系人)

动装置获得脉冲输出,不仅成本高,也增大了谐振腔的尺寸。被动调Q利用饱和吸收体如 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 的饱和吸收特性改变腔内损耗,也能实现高功率的窄脉冲输出<sup>[1~5]</sup>,减小了腔的尺寸,具有低成本、结构紧凑的特点。另外,被动调Q输出脉冲重复频率不受限于主动调Q器件的控制,由 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 的初始透射率 $T_0$ 决定。

$\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 晶体为四方晶系,锆石英结构,属于单轴晶系,晶体的四倍对称轴即为晶体的光轴 $c$ 轴,垂直于光轴 $c$ 轴的为晶体的 $a$ 、 $b$ 轴。由于晶体的各向异性, $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 晶体的输出偏振特性和切割方向有关,且对于沿着 $a$ 轴( $a$ -cut)和 $c$ 轴( $c$ -cut)方向切割的 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ ,对 $1.06\ \mu\text{m}$ 的受激发射截面不同, $a$ -cut的受激发射截面( $25 \times 10^{-19}\ \text{cm}^2$ )为 $c$ -cut( $6.5 \times 10^{-19}\ \text{cm}^2$ )的4倍<sup>[6]</sup>。2001年,Kaminskii等<sup>[6]</sup>已通过实验证明了 $\text{YVO}_4$ 是潜在的拉曼介质,在 $1\ \mu\text{m}$ 的拉曼增益高达 $4.5\ \text{cm}/\text{GW}$ ,拉曼频移为 $890\ \text{cm}^{-1}$ 。所以 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 晶体可以作为自拉曼介质即同时作为激光介质和拉曼介质来获得一阶斯托克斯光输出,主动调Q的 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 自拉曼激光器已经得到了大量的研究<sup>[7~12]</sup>。2010年,Du等<sup>[11]</sup>报道了主动调Q $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 自拉曼激光器,最高得到 $3.1\ \text{W}$ 的 $1176\ \text{nm}$ 的拉曼光输出,从抽运光到拉曼光的转换效率为 $12.4\%$ 。但是有关被动调Q $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 自拉曼激光器的研究甚少<sup>[1,13]</sup>,2004年,Y. F. Chen<sup>[1]</sup>第一次实现了被动调Q $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 自拉曼激光器,得到 $125\ \text{mW}$ 的 $1178.6\ \text{nm}$ 的拉曼光输出,从激光二极管(LD)到拉曼光的转换为 $6.3\%$ 。这也是目前为止以 $c$ -cut的 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 为自拉曼晶体获得被动调Q拉曼输出的唯一报道。

本文以 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 为饱和吸收体, $c$ -cut的 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 为自拉曼晶体,研究了在两种不同的饱和吸收体初始透射率和两种不同反射率的拉曼输出镜下拉曼光的输出特性随着抽运功率的变化。实验中 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 初始透射率为 $84\%$ 和 $91\%$ ,得到拉曼光的最高平均输出功率为 $370\ \text{mW}$ ,LD到拉曼光的转换效率为 $7.7\%$ 。实验中还得到了亚纳秒级、高功率的拉曼脉冲输出。

## 2 实验装置

LD抽运的 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 被动调Q自拉曼激光器装置如图1所示。抽运源为光纤耦合输出的LD,输出波长为 $808\ \text{nm}$ ,最大输出功率 $30\ \text{W}$ ,光纤芯径 $400\ \mu\text{m}$ ,数值孔径为 $0.22$ ,实验中通过调整LD的

温度对应 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 的峰值吸收波长。抽运光经光纤耦合输出后由耦合镜耦合到激光晶体的端面,耦合效率约为 $95\%$ 。输入镜M1为曲率 $150\ \text{mm}$ 的凹面镜,镀膜对 $808\ \text{nm}$ 高透( $T > 95\%$ ),对 $1066\ \text{nm}$ 基频光和 $1178\ \text{nm}$ 的一阶斯托克斯光高反( $R > 99.9\% @ 1066\ \text{nm}, R > 99.6\% @ 1178\ \text{nm}$ )。 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 晶体选择 $c$ -cut的,掺杂 $\text{Nd}^{3+}$ 原子数分数为 $0.5\%$ ,尺寸为 $3\ \text{mm} \times 3\ \text{mm} \times 9\ \text{mm}$ ,入射端面S1镀膜对 $808\ \text{nm}$ 高透,S1和S2两端面镀膜对 $1066\ \text{nm}$ 减反。两种饱和吸收体 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 初始透射率分别为 $84\%$ 和 $91\%$ ,前后端面都镀有 $1.06\ \mu\text{m}$ 波长的减反膜。 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 晶体侧面用铝箔包裹放置在带有水冷装置的铜块内,循环水的温度控制在 $18\ ^\circ\text{C}$ 。输出镜M2使用两种不同的拉曼输出镜OC#1和OC#2来研究拉曼光的输出特性,两种腔镜的具体参数如表1所示,实验几何腔长为 $32\ \text{mm}$ 。使用Ophir光学公司的Laserstar功率计测量输出拉曼光的平均输出功率,输出激光的时间特性用快速响应的PIN光电管探测,连接到安捷伦(DSO7104 A,  $1\ \text{GHz}$  Bandwidth,  $4\ \text{G}$  Sa/s)数字存储示波器显示和观察。

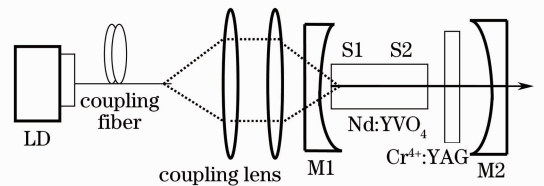


图1 LD抽运 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 被动调Q $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 自拉曼激光器实验装置图

Fig. 1 Experiment arrangement of  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  passively Q-switched  $\text{Nd}:\text{YVO}_4$  self-Raman laser

表1 两种不同输出镜的曲率和对基频光及一阶斯托克斯光的反射率

Table 1 Curvature radii and reflectivities of two output couplers at  $1066\ \text{nm}$  and  $1178\ \text{nm}$

Mirrors	Curvature radius / mm	Reflectivity at $1066\ \text{nm}$ ( $R_i$ ) / %	Reflectivity at $1178\ \text{nm}$ ( $R_s$ ) / %
OC#1	$\infty$	$>99.8$	40
OC#2	2000	99.0	95

## 3 实验结果与分析

### 3.1 不同输出镜下拉曼光输出特性

在饱和吸收体的初始透射率 $T_0 = 84\%$ 时,OC#1和OC#2两种输出耦合镜下拉曼光的平均输出功率、脉冲重复频率、脉冲宽度和单脉冲能量随

着抽运功率的变化分别如图 2(a)~(d)所示。可以看出,在一定抽运功率范围内,拉曼光的平均输出功率随着抽运功率的增大而增大,相同抽运功率下,OC#2 输出镜下的平均输出功率较大。脉冲重复频率随着抽运功率的增大而增大,因为抽运功率增大,激光介质上能级粒子数积累的速率增大,使得反转粒子数密度变大,腔内的净增益系数增大,增益达到阈值所需时间变短,所以两次漂白饱和和吸收体的间隔变小,缩短了调  $Q$  周期,增大了脉冲重复频率。两种不同曲率输出镜下计算的谐振腔腔模分布差别很小,所以拉曼光输出不同认为是由输出镜对拉曼

光的反射率  $R_s$  不同引起的。相同抽运功率下,拉曼光的平均输出功率随着  $R_s$  的增大而增大。在  $R_s = 40\%$  时,输出拉曼光的脉冲宽度为亚纳秒级,小于  $R_s = 95\%$  时纳秒级的拉曼光脉冲宽度。 $R_s$  固定时,拉曼光的脉冲宽度随着抽运功率的增大有一定的波动,但是变化不是太大。在自拉曼激光器中,抽运功率较大时,由于自拉曼晶体对抽运光的吸收和自拉曼散射的非弹性过程会导致热透镜效应,从而影响腔的稳定性。实验中发现,在抽运功率进一步增大时,拉曼光的输出功率出现下降的趋势,所以最大抽运功率为 6.3 W。

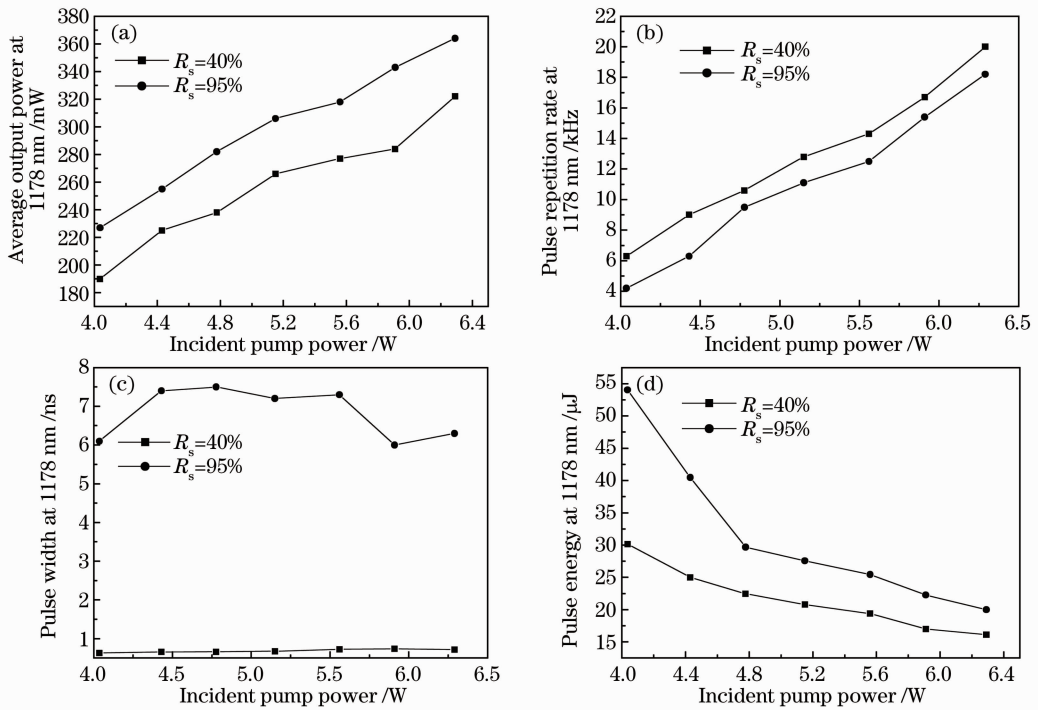


图 2  $T_0 = 84\%$  时, 1178 nm 拉曼光的平均输出功率(a)、脉冲重复频率(b)、脉冲宽度(c)和单脉冲能量(d)在  $R_s = 40\%$  和  $R_s = 95\%$  下随着抽运功率的变化关系

Fig. 2 (a) Average output power, (b) pulse repetition, (c) pulse width and (d) pulse energy of 1178 nm Raman laser with respect to the incident pump power for  $R_s = 40\%$  and  $R_s = 95\%$ ,  $T_0 = 84\%$

在抽运功率为 4 W,  $R_s = 40\%$  时输出拉曼光的平均功率为 190 mW, 单脉冲能量为 30  $\mu\text{J}$ , 相应峰值功率为 48 kW, 为实验中输出脉冲的最高峰值功率。相同抽运功率下,  $R_s = 95\%$  时拉曼光的平均输出功率为 227 mW, 单脉冲能量为 54  $\mu\text{J}$ , 为实验中输出脉冲的最高单脉冲能量, 对应峰值功率为 8.9 kW。Chen<sup>[1]</sup> 所报道的被动调  $Q$  自拉曼激光器中, 输出拉曼光的单能量随着抽运功率的变化基本不变, 而本实验中的拉曼光单脉冲能量随着抽运功率的增大而减小, 如图 2(d) 所示。单脉冲能量等于平均输出功率与相应脉冲重复频率的比值, 则平均

功率增大的速率小于脉冲重复频率增大的速率。文献[1]中最大抽运功率为 2 W, 本实验最大抽运功率为 6.3 W。分析与文献实验结果不同的可能原因: 1) 随着抽运功率的增大,  $\text{Nd}:\text{YVO}_4$  晶体中的热透镜效应明显, 导致自拉曼晶体处的腔模尺寸减小, 有效模体积减小, 而输出拉曼光的单脉冲能量与模式体积成正比, 所以使得单脉冲能量减小。2) 按照文献[14]中的解释, 随着抽运功率的增大, 激光介质对抽运光不能完全吸收, 而饱和吸收体  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  的吸收波段为 0.5~1.2  $\mu\text{m}$ , 会吸收剩余的抽运光, 这在一定程度上漂白饱和吸收体, 增大了  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$

对 $1.06\ \mu\text{m}$ 的有效初始透射率,使脉冲能量减小。实验中,相同的抽运功率下,拉曼光的单脉冲能量随着 $R_s$ 的增大而增大。

图3为用示波器观察到的被动调Q拉曼光波形图,图3(a)是在抽运功率为4.4 W,输出镜采用

OC#1镜时输出拉曼光的单脉冲波形,脉宽为530 ps。图3(b)是抽运功率为5.6 W,输出镜采用OC#2镜时拉曼光的脉冲序列特性,脉冲间隔和幅度有一定的波动,这与被动调Q机理有关,抽运源的稳定性及外界环境的干扰都会影响输出的稳定性。

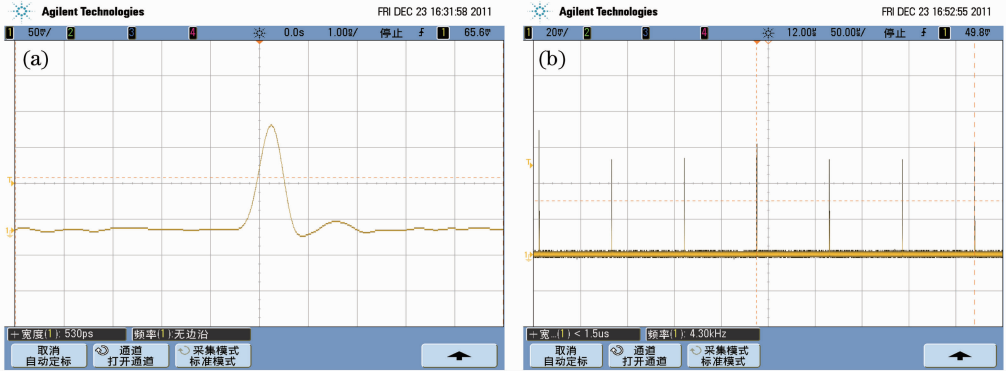


图3  $T_0=84\%$ 时输出被动调Q拉曼光的单脉冲波形(1 ns/div) (a)和脉冲序列波形(50 ns/div) (b)

Fig. 3 (a) Single pulse shape (1 ns/div) and (b) pulse train (50 ns/div) of  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  passively Q-switched  $\text{Nd}:\text{YVO}_4$  self-Raman laser for  $T_0=84\%$

### 3.2 不同 $T_0$ 下拉曼光的输出特性

相同抽运功率下,OC#2镜下拉曼光的平均输出功率高于OC#1镜下的平均输出功率,所以选择OC#2为拉曼输出镜研究饱和吸收体的初始透射率对拉曼光输出特性的影响。图4为 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$

初始透射率 $T_0$ 为84%和91%情况下拉曼光输出特性随着抽运功率的变化。

与前面不同的是,在 $T_0=91\%$ , $R_s=95\%$ 时输出拉曼光的平均功率并不是随着抽运功率的增大而一直增大,抽运功率为5.2 W时拉曼光的平均输出

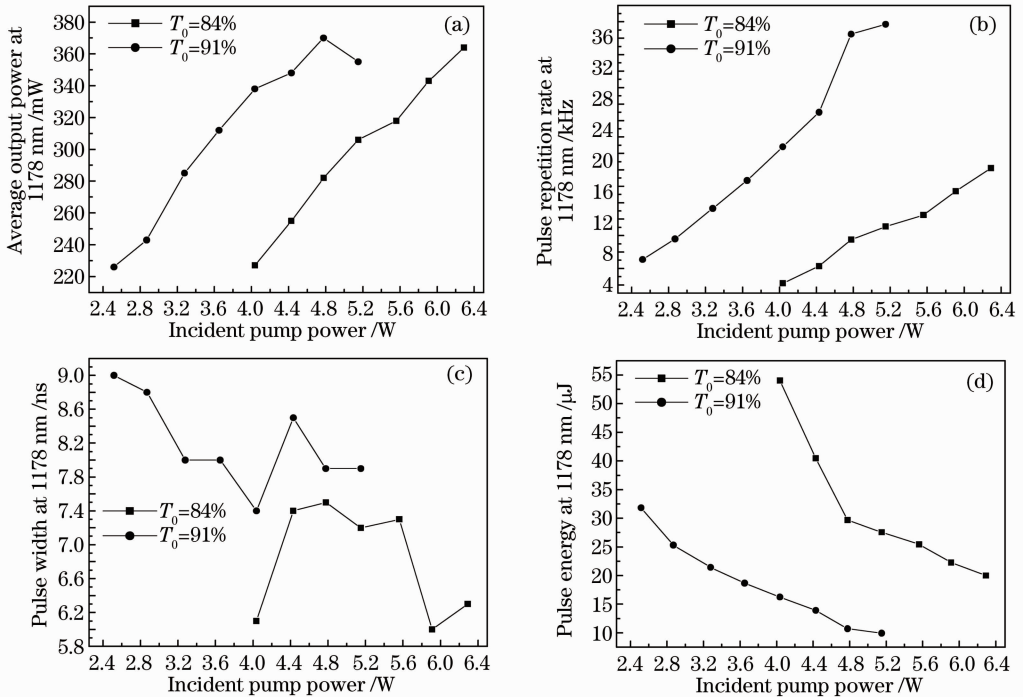


图4  $R_s=95\%$ 时,1178 nm拉曼光的平均输出功率(a)、脉冲重复频率(b)、脉冲宽度(c)和单脉冲能量(d)在 $T_0=84\%$ 和 $91\%$ 下随着抽运功率的变化关系

Fig. 4 (a) Average output power, (b) pulse repetition, (c) pulse width and (d) pulse energy of 1178 nm Raman laser with respect to the incident pump power for  $T_0=84\%$  and  $T_0=91\%$ ,  $R_s=95\%$



功率开始减小。这是由于在抽运功率较大时,自拉曼晶体的热透镜效应影响了腔的稳定性造成的。相同抽运功率下,拉曼光的平均输出功率随着  $T_0$  的增大而增大。在抽运功率为 4.8 W,  $R_s = 95\%$  时拉曼光的平均输出功率为 370 mW, 相应 LD 到拉曼光的转换效率为 7.7%。因为饱和吸收体的初始透射率  $T_0$  增大, 腔内损耗减小, 阈值减小, 在抽运功率不变的情况下反转粒子数达到阈值积累的时间减小, 使得脉冲间隔变小, 所以脉冲重复频率增大, 并且脉冲宽度增大。由被动调  $Q$  腔内拉曼激光器理论分析可知<sup>[15]</sup>,  $T_0$  增大, 激光晶体上能级初始反转粒子数密度减小, 所以输出拉曼光的单脉冲能量减小。实验中所测得拉曼光的脉宽随着抽运功率的增大变化没有明显的规律, 呈现波动的现象, 这与实验中抽运源的稳定性、腔的调节及环境的影响有关。

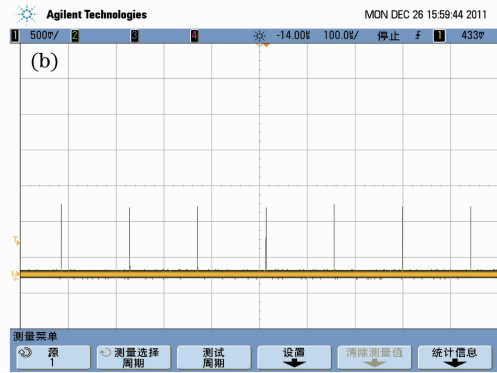
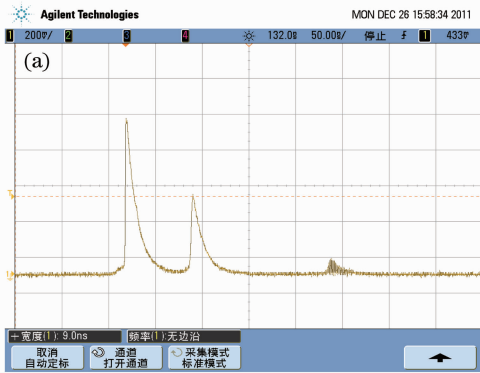


图 5  $T_0 = 91\%$ ,  $R_s = 95\%$  时输出被动调  $Q$  拉曼光的单脉冲波形 (50 ns/div) (a) 和脉冲序列波形 (100 ns/div) (b)

Fig. 5 (a) Single pulse shape (50 ns/div) and (b) pulse train pulse (100 ns/div) of  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  passively  $Q$ -switched  $\text{Nd}:\text{YVO}_4$  self-Raman laser for  $T_0 = 91\%$ ,  $R_s = 95\%$

## 4 结 论

对 LD 抽运的  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  被动调  $Q$ -cut 的  $\text{Nd}:\text{YVO}_4$  自拉曼激光器进行了实验研究, 研究了  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  的初始透射率和输出镜的反射率对拉曼光平均输出功率、脉冲重复频率、单脉冲能量和脉冲宽度的影响, 并做了一些解释。由实验结果可知: 1) 在  $T_0 = 84\%$ ,  $R_s = 40\%$  时能够得到亚纳秒级、峰值功率高达几十千瓦的拉曼光输出; 2)  $T_0 = 91\%$ ,  $R_s = 95\%$  能够得到较高平均功率和转换效率的拉曼光输出, 实验中得到拉曼光最高平均输出功率为 370 mW, 从 LD 到拉曼光的转换效率为 7.7%; 3)  $T_0 = 84\%$ ,  $R_s = 95\%$  时能够获得高单脉冲能量的拉曼光输出。通过选择合适的饱和吸收体初始透射率和拉曼输出镜可以得到不同要求特性的拉曼光输出。对于实验中  $T_0$  较高出现的拉曼多脉冲现象,

图 5 为  $T_0 = 91\%$ ,  $R_s = 95\%$ , 抽运功率为 2.5 W 时用示波器观察到的拉曼光脉冲波形。图 5(a) 为单脉冲波形, 脉宽 9 ns, 出现了拉曼多脉冲的现象; 图 5(b) 为输出拉曼光脉冲序列图, 幅值和脉冲间隔比较稳定。由图 3(a) 可以看出, 在  $R_s = 40\%$  时得到的拉曼光脉冲波形几乎是对称的, 而在  $R_s = 95\%$  时得到的拉曼光脉冲波形下降沿比上升沿要大, 如图 5(a) 所示。因为输出镜对拉曼光的反射率较大时, 谐振腔内损耗小, 光子寿命较长, 腔内光强衰减得慢, 所以脉冲的下降沿较大。拉曼光多脉冲的产生和被动调  $Q$  基频光多脉冲产生机理相似, 张行愚等<sup>[16]</sup> 对被动调  $Q$  基频光多脉冲现象给予了详细的解释。与基频光的被动调  $Q$  多脉冲不同的是, 拉曼光的小脉冲数多于一个, 小脉冲的峰值功率随着与主脉冲距离的增大而减小。

可以通过减小拉曼输出镜的反射率来抑制, 在以后的实验将对此最佳反射率进行研究。

## 参 考 文 献

- 1 Y. F. Chen. Efficient subnanosecond diode-pumped passively  $Q$ -switched  $\text{Nd}:\text{YVO}_4$  self-stimulated Raman laser[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(11): 1251~1253
  - 2 Hiroshi Sakai, Hirohumi Kan, Takunori Taira. >1 MW peak power single-mode high-brightness passively  $Q$ -switched  $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$  microchip laser [J]. *Opt. Express.*, 2008, **16** (24): 19891~19899
  - 3 Y. F. Chen, M. L. Ku, L. Y. Tsai *et al.*. Diode-pumped passively  $Q$ -switched picosecond  $\text{Nd}:\text{Gd}_2\text{Y}_{1-x}\text{VO}_4$  self-stimulated Raman laser[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(19): 2279~2281
  - 4 Y. F. Chen. Compact efficient self-frequency Raman conversion in diode-pumped passively  $Q$ -switched  $\text{Nd}:\text{GdVO}_4$  laser [J]. *Appl. Phys. B.*, 2004, **78**: 685~687
  - 5 Zheng Quan, Zhao Ling, Shao Yonghong *et al.*.  $\text{Cr}:\text{YAG}$  passively  $Q$ -switched all-solid-state blue laser at 473 nm [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(8): 673~676
- 郑 权, 赵 岭, 邵永红等.  $\text{Cr}:\text{YAG}$  被动调  $Q$  全固态 473 nm

- 蓝光激光器[J]. 中国激光, 2003, **30**(8): 673~676
- 6 A. A. Kmainkii, K. I. Ueda, H. J. Eichler *et al.*. Tetragonal vanadates YVO<sub>4</sub> and GdVO<sub>4</sub> — new efficient  $\chi^{(3)}$ -materials for Raman lasers[J]. *Opt. Commun.*, 2001, **194**(1-3): 201~206
- 7 Y. F. Chen. High-power diode-pumped actively Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub> self-Raman laser: influence of dopant concentration[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(16): 1915~1917
- 8 X. H. Chen, X. Y. Zhang, Q. P. Wang *et al.*. Diode-pumped actively Q-switched c-cut Nd:YVO<sub>4</sub> self-Raman laser[J]. *Laser. Phys. Lett.*, 2009, **6**(1): 26~29
- 9 Fufang Su, Xingyu Zhang, Qingpu Wang *et al.*. Diode pumped actively Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub> self-Raman laser[J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2006, **39**(10): 2090~2093
- 10 Z. C. Wang, C. L. Du, S. C. Ruan *et al.*. LD-pumped Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub> self-Raman laser[J]. *Laser. Phys.*, 2010, **20**(2): 474~477
- 11 C. L. Du, L. Zhang, Y. Q. Yu *et al.*. 3.1 W laser-diode-end-pumped composite Nd:YVO<sub>4</sub> self-Raman laser at 1176 nm[J]. *Appl. Phys. B.*, 2010, **101**: 743~746
- 12 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
- 13 T. Omatsu, A. Lee, H. M. Pask *et al.*. Passively Q-switched yellow laser formed by a self-Raman composite Nd:YVO<sub>4</sub>/YVO<sub>4</sub> crystal[J]. *Appl. Phys. B.*, 2009, **97**: 799~804
- 14 Martin A. Jaspan, David Welford, Jeffrey A. Russell. Passively Q-switched microlaser performance in the presence of pump-induced bleaching of the saturable absorber[J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(12): 2555~2560
- 15 Shuanghong Ding, Xingyu Zhang, Qingpu Wang *et al.*. Numerical modelling of passively Q-switched intracavity Raman lasers[J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2007, **40**: 2736~2747
- 16 Zhang Xingyu, Zhao Shengzhi, Wang Qingpu *et al.*. Theoretical and experiment study of Cr<sup>4+</sup>:YAG Q-switching characteristics [J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(9): 1180~1185
- 张行愚, 赵圣之, 王青圃 等. Cr<sup>4+</sup>:YAG 调 Q 特性的理论和实验研究[J]. 光学学报, 1998, **18**(9): 1180~1185

栏目编辑:宋梅梅