

文章编号: 0253-2239(2007)10-1831-5

# 被动调 Q 自拉曼 Nd:GdVO<sub>4</sub> 激光器 \*

苏富芳 张行愚 王青圃 李述涛 贾 鹏 丛振华 张晓磊

(山东大学信息科学与工程学院, 济南 250100)

**摘要:** 对激光二极管(LD)抽运的自拉曼 Nd:GdVO<sub>4</sub> 被动调 Q 激光器进行了详细的理论和实验研究。实验中采用 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体同时作为激光介质和拉曼晶体, 分别用了两块不同初始透射率的 Cr<sup>4+</sup>:YAG 晶体, 得到并比较了采用不同初始透射率的 Cr<sup>4+</sup>:YAG 晶体时被动调 Q 自拉曼激光器的性能。测量了平均输出功率、脉冲宽度和脉冲重复率随抽运功率的变化关系。当 Cr<sup>4+</sup>:YAG 的初始透射率为 0.91, 输入功率是 5.7 W 时, 得到的拉曼光的最高功率为 244.6 mW, 相应的转换效率为 4.3%。通过数值求解基频光和拉曼光空间分布的速率方程并应用到被动调 Q 自拉曼 Nd:GdVO<sub>4</sub> 激光器。获得的理论结果与实验结果大致相符。

**关键词:** 激光器; 固体激光器; 拉曼激光器; 受激拉曼散射; Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体; 被动调 Q

中图分类号: TN248.1 文献标识码: A

## Passively Q-Switched Nd:GdVO<sub>4</sub> Self-Raman Laser

Su Fufang Zhang Xingyu Wang Qingpu Li Shutao Jia Peng  
Cong Zhenhua Zhang Xiaolei

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

**Abstract:** In this paper, a laser-diode pumped passively Q-switched Nd:GdVO<sub>4</sub> self-Raman laser is studied theoretically and experimentally in detail. In the experiment, by using Nd:GdVO<sub>4</sub> as the gain medium and Raman medium simultaneously, using two Cr<sup>4+</sup>:YAG crystals with different initial transmissivity as the saturable absorber, respectively, the passively Q-switched operation of the self-Raman Nd:GdVO<sub>4</sub> laser at 1176 nm was investigated and compared. The average power, pulse energy, pulse width and pulse repetition rate of diode pumped passively Q-switched Nd:GdVO<sub>4</sub> self-Raman laser at 1176 nm with respect to the incident pump power were measured. The obtained maximum output average power is 244.6 mW with respect to incident power of 5.7 W and the corresponding conversion efficiency is 4.3% with initial transmissivity of 0.91. In the theoretical part, we used the rate equations to obtain the theoretical results. In the rate equations, the Gaussian distributions of the intracavity photon densities of the fundamental and Raman lasers and the initial population inversion density were taken into account. The obtained theoretical results were in agreement with the experimental results on the whole.

**Key words:** lasers; solid-state laser; Raman laser; stimulated Raman scattering; Nd:GdVO<sub>4</sub> crystal; passive Q-switching

## 1 引 言

Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体和 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体属于同构体, Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体比 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的热导率大, 激光特性与 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体相似, 已经被证明是优良的激光介质<sup>[1~5]</sup>。2001 年, Kaminskii 等发现 GdVO<sub>4</sub> 晶体和 YVO<sub>4</sub> 晶体还是优良的拉曼介质<sup>[6]</sup>, 提出 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体和 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体可以作为自拉曼晶体并可应用于可见光和近红外区域<sup>[7]</sup>。

Y. F. Chen 报道了激光二极管(LD)抽运的 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体被动调 Q 情况下的 1175.6 nm 拉曼激光特性和主动调 Q 情况下的 1521 nm 拉曼激光特性<sup>[8,9]</sup>。T. T. Basiev 等报道了激光二极管抽运的以 LiF:F<sub>2</sub><sup>-</sup> 作为被动调 Q 晶体的 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体 1174 nm 拉曼激光特性<sup>[10]</sup>。

描述拉曼激光器运转特性的有效工具是速率方程, 平面波近似下的速率方程简单但不精确<sup>[11~13]</sup>,

\* 教育部留学回国人员科研启动基金和山东省科学技术发展计划重点项目(2004GG2203098)资助课题。

作者简介: 苏富芳(1977-), 女, 山东人, 博士研究生, 主要从事激光物理与技术方面的研究。

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

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

E-mail: xyz@sdu.edu.cn

收稿日期: 2007-02-14; 收到修改稿日期: 2007-03-26

实际激光器腔内的光子数分布是不均匀的,TEM<sub>00</sub>模运转的激光腔内的光子数密度分布为高斯型,考虑基频光,拉曼光和反转粒子数密度空间分布的速率方程要更精确<sup>[14]</sup>。本文进一步对激光二极管抽运的自拉曼 Nd:GdVO<sub>4</sub> 被动调 Q 激光器进行了详细的理论与实验研究。通过分别利用两块不同初始透射率的 Cr<sup>4+</sup>:YAG 晶体,产生了 1176 nm 的拉曼激光。测量了平均输出功率、脉冲宽度和脉冲重复率随抽运功率的变化。研究和比较了自拉曼 Nd:GdVO<sub>4</sub> 激光器的输出特性。通过数值求解基频光和拉曼光空间分布的速率方程并应用到被动调 Q 自拉曼 Nd:GdVO<sub>4</sub> 激光器。获得的理论结果与实验结果大致相符。

## 2 实验装置与结果

激光器结构如图 1 所示。基频光波长为 1066 nm,拉曼激光波长为 1176 nm。后腔镜 M<sub>1</sub> 是曲率为 300 mm 的凹镜,对 1066 nm 基频光和 1176 nm 拉曼光高反( $R > 99.7\%$ ),对 808 nm 的抽运光高透( $T > 96\%$ )。输出耦合镜为平面镜,对 1066 nm 光的反射率为 99.9%,对 1176 nm 拉曼光的反射率为 94.2%。Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体同时作为激光介质和拉曼晶体,掺 Nd 原子数分数为 0.5%,尺寸为 3 mm × 3 mm × 10 mm,沿 c 轴方向切割,前后端面都镀有 1066 nm 和 1176 nm 波长光的增透膜,前端面镀有 808 nm 波长光的增透膜。实验中采用的 Cr<sup>4+</sup>:YAG 的初始透射率  $T_0$  分别为 0.91 和 0.95,被动调 Q 晶体长度为 2 mm,前后端面镀有 1.0~1.35 μm 波段光的增透膜。激光谐振腔长度为 40 mm。

图 2 和图 3 给出了在 Cr<sup>4+</sup>:YAG 的初始透射率分别为 0.91 和 0.95 时,自拉曼 Nd:GdVO<sub>4</sub> 激光器的平均输出功率和脉冲重复率随着抽运功率的变化。

由图 2 中当 Cr<sup>4+</sup>:YAG 的初始透射率分别为 0.91 和 0.95 时,可以得出的拉曼阈值分别为 3.76 W 和 3.07 W,对应的斜效率为 12.3% 和 9.52%。当

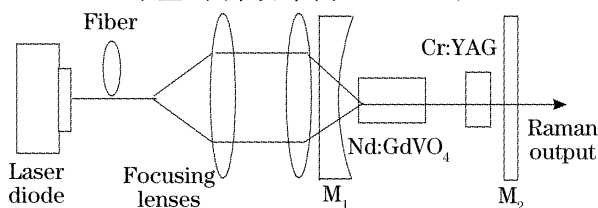


图 1 激光二极管抽运被动调 Q 自拉曼 Nd:GdVO<sub>4</sub> 激光器实验装置

Fig. 1 Experimental arrangement of the diode-pumped passively Q-switched Nd:GdVO<sub>4</sub> self-Raman laser

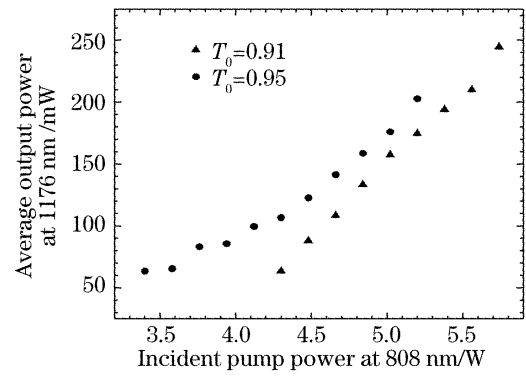


图 2  $T_0$  分别为 0.91 和 0.95 时,平均输出功率与抽运功率的关系

Fig. 2 Average output power at 1176 nm with respect to the incident pump power for  $T_0 = 0.91$  and  $T_0 = 0.95$ , respectively

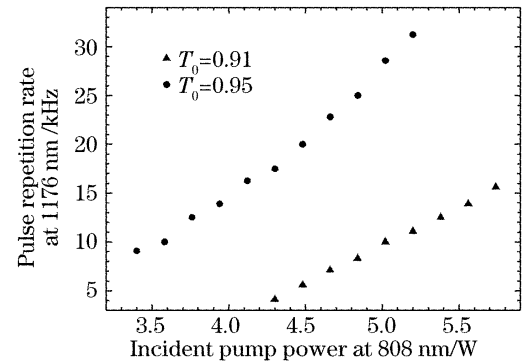


图 3  $T_0$  分别为 0.91 和 0.95 时,脉冲重复率与抽运功率的关系

Fig. 3 Pulse repetition rate at 1176 nm with respect to the incident pump power for  $T_0 = 0.91$  and  $T_0 = 0.95$ , respectively

输入功率为 5.7 W 和 5.2 W 时,相应的最高输出功率为 244.6 mW 和 202.7 mW,转换效率分别为 4.3% 和 3.9%。由图 3 可以看出随着 Cr<sup>4+</sup>:YAG 的初始透射率增大,脉冲重复率增加,且随着抽运功率的增大而增加。通过自拉曼 Nd:GdVO<sub>4</sub> 激光器的平均输出功率和脉冲重复率可以得到输出的单脉冲能量,如图 4 所示。由图 4 可以看出,对于给定一个  $T_0$ ,输出拉曼激光的单脉冲能量基本上不变,就是说 Nd:GdVO<sub>4</sub> 自拉曼激光器的输出单脉冲能量基本上不随抽运功率的变化而变化。当  $T_0$  分别为 0.91 和 0.95 时,输出的单脉冲能量分别为  $15.6 \pm 0.5 \mu\text{J}$  和  $6.5 \pm 0.4 \mu\text{J}$ 。图 5 给出了当  $T_0$  分别为 0.91 和 0.95 时,输出的拉曼激光的脉冲宽度与抽运功率的关系。由图 5 可以看出,当  $T_0$  下降时,脉冲宽度变窄,脉冲宽度随着抽运功率的变化比较平缓。

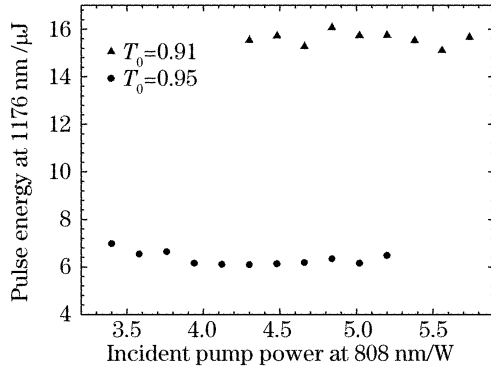


图 4  $T_0$  分别为 0.91 和 0.95 时, 脉冲能量与抽运功率的关系

Fig. 4 Pulse energy at 1176 nm with respect to the incident pump power for  $T_0=0.91$  and  $T_0=0.95$ , respectively

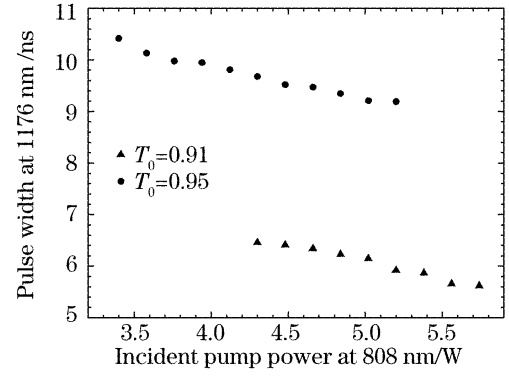


图 5  $T_0$  分别为 0.91 和 0.95 时, 脉冲宽度与抽运功率的关系

Fig. 5 Pulse width at 1176 nm with respect to the incident pump power for  $T_0=0.91$  and  $T_0=0.95$ , respectively

### 3 理论分析

TEM<sub>00</sub> 模式下腔内的基频光子数密度和拉曼光子数密度可以表示为

$$\varphi_{L,R}(r,t) = \varphi_{L,R}(0,t) \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_{L,R}^2}\right), \quad (1)$$

式中  $r$  为径向坐标,  $\omega$  为腔模的半径, 由腔型决定, 脚标 L 和 R 分别代表基频光和拉曼光。  $\varphi(0,t)$  为轴向

的光子数密度。在被动调 Q 激光器的速率方程中加入描述受激拉曼散射效应的一项和一阶斯托克斯光的微分方程就可以得到被动调 Q 拉曼激光器的速率方程。对文献[15]中的速率方程进行修改可以得到考虑空间高斯分布的被动调 Q 自拉曼激光器的速率方程:

$$\int_0^\infty \frac{d\varphi_L(r,t)}{dt} 2\pi r dr = \int_0^\infty \frac{2\varphi_L(r,t)}{t_{RT}} \{ \sigma n(r,t) l - \sigma_g n_s(r,t) l_s - \sigma_e [n_{s0} - n_s(r,t)] l_s \} 2\pi r dr - \int_0^\infty \frac{2\varphi_L(r,t)}{t_{RT}} gh\nu_R c \varphi_R(r,t) l_r 2\pi r dr - \int_0^\infty \frac{\varphi_L(r,t)}{t_{RT}} \left[ \ln\left(\frac{1}{R_L}\right) + L \right] 2\pi r dr, \quad (2)$$

$$\int_0^\infty \frac{d\varphi_R(r,t)}{dt} 2\pi r dr = \int_0^\infty \frac{2\varphi_R(r,t)}{t_{RT}} gh\nu_R c \varphi_L(r,t) l_r 2\pi r dr - \int_0^\infty \frac{2\varphi_R(r,t)}{t_{RT}} \{ R_{ratio} \sigma_g n_s(r,t) l_s + R_{ratio} \sigma_e [n_{s0} - n_s(r,t)] l_s \} 2\pi r dr - \int_0^\infty \frac{\varphi_R(r,t)}{t_{RT}} \left[ \ln\left(\frac{1}{R_R}\right) + L \right] 2\pi r dr + k_{sp} \int_0^\infty \varphi_L(r,t) 2\pi r dr, \quad (3)$$

$$\frac{dn(r,t)}{dt} = -\gamma \sigma c \varphi_L(r,t) n(r,t) - \frac{n}{t_{sp}}, \quad (4)$$

$$\frac{dn_s(r,t)}{dt} = -\frac{S_L}{S_s} \sigma_g c \varphi_L(r,t) n_s(r,t) - R_{ratio} \sigma_g c \varphi_R(r,t) n_s(r,t), \quad (5)$$

式中  $n(r,t)$  为反转粒子数密度,  $n_s(r,t)$  和  $n_{s0}$  分别为饱和吸收体基态和总的粒子数密度,  $l_s$  和  $l_r$  分别为饱和吸收体和拉曼晶体的长度。  $t_{RT} = 2l_c/c$  为光在腔内的往返时间,  $l_c$  为腔的光学长度,  $c$  为真空中的光速,  $h\nu_R$  为拉曼激光的光子能量。  $R_L$  和  $R_R$  分别

是输出镜对基频光和拉曼光的反射率。其他的参量和数值见表 1, 其中  $\sigma$  为激光介质的受激发射截面,  $\sigma_g$  为饱和吸收体的基态吸收截面,  $\sigma_e$  为饱和吸收体的激发态吸收截面,  $\gamma$  为反转因子,  $R_{ratio}$  为基频光和拉曼光在饱和吸收体中的吸收截面的比值,  $t_{sp}$  为激

光介质自发发射寿命,  $L$  为腔的耗散性损耗,  $g$  为拉曼介质对 1064 nm 波长的增益系数,  $k_{sp}$  为自发拉曼散射因子,  $S_e$  为基频光在激光晶体中的光束面积,  $S_s$  为基频光在  $Cr^{4+}:YAG$  中的光束面积。

表 1 计算中所用参数的数值

Table 1 Parameters used in the calculations

Parameters	Values	Parameters	Values
$\sigma/m^2$	$1.2 \times 10^{-23}$	$L$	0.05
$\sigma_g/m^2$	$4.3 \times 10^{-22}$ [16]	$g/(m/W)$	$4.5 \times 10^{-11}$
$\sigma_e/m^2$	$8.2 \times 10^{-23}$ [16]	$k_{sp}/s^{-1}$	$2 \times 10^{-10}$
$\gamma$	0.71	$S_l/m^2$	$1.2 \times 10^{-7}$
$R_{ratio}$	0.2	$S_s/m^2$	$1.1 \times 10^{-7}$
$t_{sp}/\mu s$	100		

速率方程中我们忽略掉抽运项。调 Q 脉冲形

成过程中, 因为大多数固态饱和吸收体的基态恢复缓慢, 所以激发过程中的饱和吸收体的基态恢复可以忽略不计。

假设初始的反转粒子数密度为高斯分布, 可以表示为

$$n(r, 0) = n(0, 0) \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_p^2}\right), \quad (6)$$

式中  $\omega_p$  是增益介质中抽运光束的平均半径,  $n(0, 0)$  是轴向的初始反转粒子数密度。由于基态恢复时间相对于两个脉冲的时间间隔来说短的多,  $n_s(r, t)$  的初始值等于  $n_{s0}$ 。通过采用文献[15]的方法可以得到

$$\begin{aligned} \frac{d\varphi_L(0, t)}{dt} = & \frac{4l\sigma\varphi_L(0, t)n(0, 0)}{\omega_L^2 t_{RT}} \int_0^\infty \exp\left[-\frac{t}{t_{sp}} - \gamma\sigma c \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_L^2}\right) \int_0^t \varphi_L(0, t) dt\right] \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_p^2}\right) \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_L^2}\right) 2rdr - \\ & \frac{4l_s\varphi_L(0, t)n_{s0}}{\omega_L^2 t_{RT}} (\sigma_g - \sigma_e) \int_0^\infty \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_L^2}\right) \exp\left[-\frac{S_L}{S_s} \sigma_g c \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_L^2}\right) \int_0^t \varphi_L(0, t) dt - \right. \\ & \left. R_{ratio} \sigma_g c \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_R^2}\right) \int_0^t \varphi_R(0, t) dt\right] 2rdr - \frac{2gh\nu_R c l_r \varphi_L(0, t) \varphi_R(0, t)}{t_{RT}} \frac{1}{1 + \omega_L^2/\omega_R^2} - \\ & \frac{\varphi_L(0, t)}{t_{RT}} \left[ \ln\left(\frac{1}{R_L}\right) + \frac{\sigma_e}{\sigma_g} \ln\left(\frac{1}{T_0^2}\right) + L \right], \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\varphi_R(0, t)}{dt} = & \frac{2gh\nu_R c \varphi_L(0, t) \varphi_R(0, t)}{t_{RT}} \frac{1}{1 + \omega_R^2/\omega_L^2} - \frac{4R_{ratio} l_s n_{s0} \varphi_R(0, t)}{\omega_R^2 t_{RT}} (\sigma_g - \sigma_e) \times \int_0^\infty \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_R^2}\right) \\ & \exp\left[-\frac{S_L}{S_s} \sigma_g c \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_L^2}\right) \int_0^t \varphi_L(0, t) dt - R_{ratio} \sigma_g c \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_R^2}\right) \int_0^t \varphi_R(0, t) dt\right] 2rdr - \\ & \frac{\varphi_R(0, t)}{t_{RT}} \left[ \ln\left(\frac{1}{R_R}\right) + R_{ratio} \frac{\sigma_e}{\sigma_g} \ln\left(\frac{1}{T_0^2}\right) + L \right] + k_{sp} \varphi_L(0, t) \frac{\omega_L^2}{\omega_R^2}, \end{aligned} \quad (8)$$

令  $d\varphi_L(0, t)/dt$  和  $\varphi_L(0, t)$  在  $t=0$  时的值为零, 由(7)式可以得到光轴处的初始反转粒子数密度

$$n(0, 0) = \frac{\ln(1/R_L) + \ln(1/T_0^2) + L}{2\sigma l} \left(1 + \frac{\omega_L^2}{\omega_p^2}\right), \quad (9)$$

$T_0$  是饱和吸收体的小信号透射率:

$$T_0 = \exp(-\sigma_g n_{s0} l_s). \quad (10)$$

由(9)式可以看出当  $T_0$  减小时, 腔内的损耗增加, 从而使阈值增加, 因此对于相同的抽运功率, 需要更长的时间来实现达到阈值的反转粒子数, 同时也增加了饱和吸收体的漂白时间, 所以导致脉冲重复率的减小。阈值的增加使激光介质上能级的反转粒子数相应增加, 并且使脉冲宽度减小。数值求解(7)式、(8)式, 可以得到在  $T_0$  分别为 0.91 和 0.95 时,

单脉冲的能量分别为 18.1  $\mu J$  和 5.4  $\mu J$ , 脉冲宽度分别为 3.1 ns 和 5.5 ns, 峰值功率分别为 5.48 kW 和 0.98 kW。采用文献[11]中平面波近似的速率方程求解, 可以得到在  $T_0$  分别为 0.91 和 0.95 时, 单脉冲的能量为 20.7  $\mu J$  和 8.2  $\mu J$ , 脉冲宽度分别为 2.4 ns 和 3.1 ns, 峰值功率分别为 8.62 kW 和 2.64 kW。由此可见, 考虑腔内光子数密度空间分布的被动调 Q 速率方程能更好地描述拉曼激光器的输出特性。在速率方程中我们忽略了几个因素, 如饱和吸收体的上能级寿命和晶体热效应, 而且我们认为基频光和拉曼光的损耗是一样的。考虑到这些因素的影响理论求解速率方程的结果和实验结果基本上是符合的。

## 4 结 论

利用 Nd:GdVO<sub>4</sub> 作为自拉曼晶体, Cr<sup>4+</sup>:YAG 为饱和吸收体, 对被动调 Q 自拉曼 Nd:GdVO<sub>4</sub> 激光器进行了详细的理论与实验研究。通过分别利用两块不同初始透射率的饱和吸收体, 详细研究和比较了被动调 Q 自拉曼 Nd:GdVO<sub>4</sub> 激光器的输出特性, 包括平均输出功率、脉冲能量、脉冲宽度和脉冲重复率。通过数值求解考虑空间分布的速率方程, 得到的理论结果基本上可以描述固体拉曼激光器的运转。

## 参 考 文 献

- Sanjun Zhang, E. Wu, Heping Zeng. Q-switched mode-locking by Cr<sup>4+</sup>:YAG in a laser-diode-pumped c-cut Nd:GdVO<sub>4</sub> laser [J]. *Opt. Commun.*, 2004, **231**(1~6): 365~369
- Chuanbo Gong, Changshui Chen, Bian Wu *et al.*. All solid-state passively Q-switched frequency-doubled intra-cavity Nd:GdVO<sub>4</sub>/KTP laser[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(2): 94~96
- S. P. Ng, D. Y. Tang, L. J. Qin. High power passively Q-switched Nd:GdVO<sub>4</sub> lasers [J]. *Opt. Commun.*, 2004, **229**(1~6): 331~336
- Li Haifen, Zhou Rui, Zhao Pu *et al.*. 1386 nm continuous wave output from laser diode end-pumped 1386 nm Nd:YVO<sub>4</sub> laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7): 1069~1072 (in Chinese)  
李海峰, 周睿, 赵璞等. 激光二极管端面抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 实现 1386 nm 连续波激光输出[J]. *光学学报*, 2006, **26**(7): 1069~1072
- Xu Fanghua, Ma Lili, Wang Zhengping *et al.*. Laser diode-pumped Nd:GdVO<sub>4</sub> microchip laser[J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(9): 1166~1168 (in Chinese)  
徐方华, 马丽丽, 王正平等. 激光二极管抽运 Nd:GdVO<sub>4</sub> 微片激光器[J]. *中国激光*, 2005, **32**(9): 1166~1168
- Alexander A. Kaminskii, Ken-ichi Ueda, Hans J. Eichler. 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
- Hu Dawei, Yu Haohai, Wang Zhengping *et al.*. Efficient stimulated Raman scattering of YVO<sub>4</sub> crystal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(6): 918~920 (in Chinese)  
胡大伟, 于浩海, 王正平等. YVO<sub>4</sub> 晶体的高效受激拉曼散射[J]. *光学学报*, 2006, **26**(6): 918~920
- 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
- Y. F. Chen. Efficient 1521-nm Nd:GdVO<sub>4</sub> Raman laser[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(22): 2632~2634
- T. T. Basiev, S. V. Vassiliev, V. A. Konjushkin. Diode pumped 500-picosecond Nd:GdVO<sub>4</sub> Raman laser [J]. *Laser Phys. Lett.*, 2004, **1**(5): 237~240
- A. A. Demidovich, P. A. Apanasevich, L. E. Batay *et al.*. Sub-nanosecond microchip laser with intracavity Raman conversion[J]. *Appl. Phys. B*, 2003, **76**(5): 509~514
- Weibiao Chen, Yuji Inagawa, Takashige Omatsu *et al.*. Diode-pumped, self-stimulating, passively Q-switched Nd:PbWO<sub>4</sub> Raman laser[J]. *Opt. Commun.*, 2001, **194**(4~6): 401~407
- Yurii V. Loiko, Alexander A. Demidovich, Vladimir V. Burakerich *et al.*. Stokes pulse energy of Q-switched lasers with intracavity Raman conversion[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2005, **22**(11): 2450~2458
- A. A. Demidovich, S. V. Voitikov, L. E. Batay *et al.*. Modeling and experimental investigation of short pulse Raman microchip laser[J]. *Opt. Commun.*, 2006, **263**(1): 52~59
- Xingyu Zhang, Shengzhi Zhao, Qingpu Wang *et al.*. Modeling of passively Q-switched lasers[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2000, **17**(7): 1166~1175
- Xingyu Zhang, Alain Brenier, Jiyang Wang *et al.*. Absorption cross-sections of Cr<sup>4+</sup>:YAG at 946 nm and 914 nm[J]. *Opt. Mater.*, 2004, **26**(3): 293~296