

文章编号: 0258-7025(2005)04-0461-05

# 激光二极管抽运声光调 Q 高重复频率 532 nm 激光器

冯立春, 霍玉晶, 何淑芳, 杨成伟  
(清华大学电子工程系, 北京 100084)

**摘要** 实现了重复频率高达 105 kHz 的紧凑的全固态声光(A-O)调 Q 532 nm 腔内倍频激光器。激光器使用 Nd:YVO<sub>4</sub> 作为激光晶体, 类匹配的 KTP 为倍频晶体, 声光器件材料为熔融石英, 由自制的声光驱动器驱动, 其最大射频输出功率为 7.5 W, 重复频率 1 Hz~105 kHz 可调。使用 1 W 的激光二极管(LD)抽运, 50 kHz 重复频率下, 得到平均功率达 224 mW 的 532 nm 脉冲激光稳定平均输出, 总光-光转换效率高达 22.4%。低重复频率下, 可以实现脉宽为 17.2 ns, 峰值功率为 470 W, 单脉冲能量为 8.1 μJ 的稳定运转。给出了平均功率与重复频率关系的一般公式, 并提出即使是在四能级系统中, 有效储能时间也并不等于上能级寿命, 理论计算结果与实验结果吻合得很好。

**关键词** 激光技术; 固体激光器; 激光二极管抽运; 储能时间; 声光调 Q; 内腔倍频; 高重复频率  
**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A

## LD-pumped Acousto-optically Q-switched 532 nm Laser with High Repetition Rate

FENG Li - chun, HUO Yu - jing, HE Shu - fang, YANG Cheng - wei  
(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract** A compact, all solid-state and high repetition rate as up to 105 kHz acousto-optic (A-O) Q-switched intracavity frequency-doubled 532 nm laser is demonstrated. A Nd:YVO<sub>4</sub> crystal is used as active media and a type- KTP (KTiPO<sub>4</sub>) as frequency doubler. The Q switcher is made by fused silica and driven by a driver whose maximal rf output power is 7.5 W and repetition rate is variable from 1 Hz to 105 kHz, which is made by our own. 224 mW of 532 nm average power at a repetition rate of 50 kHz was generated with a 1 W laser diode (LD) as pump source, and a high optical-to-optical conversion efficiency of 22.4% was obtained. Under low repetition rate, steady operation is achieved with pulse width of 17.2 ns, peak power of 470 W and single pulse energy of 8.1 μJ. A general formula of average-power as a function of pulse repetition rate is presented which has good agreement with the experiment results. Analysis and experimental verification showed that, even in four-level system, the effective storage time is not equal to the upper state lifetime.

**Key words** laser technique; solid-state laser; laser diode pumped; storage time; acousto-optics Q-switched; intracavity second harmonic generation; high repetition-rate

## 1 引 言

声光(A-O)调 Q 脉冲激光器已被广泛应用于激光测距、大气监测、激光雷达、光电对抗、激光加工和医疗等领域。相对闪光灯抽运激光器而言,激光二极管(LD)抽运的固体激光器因其高效、紧凑、使用寿命长,且易获得高质量光束等特点而更具有优势。Nd:YVO<sub>4</sub>晶体在较宽的抽运波长范围内都有

很好的吸收,在激光发射波长上有很大的受激发射截面,而且具有线偏振发射的特性,使其在激光二极管抽运腔内倍频激光器中得到广泛的应用<sup>[1-3]</sup>。

近年来,使用 Nd:YAG<sup>[4,5]</sup>和 Nd:YVO<sub>4</sub><sup>[6]</sup>的声光调 Q 腔内倍频绿光激光器都达到了较高的水平,被动调 Q 绿光激光器也有报道<sup>[7]</sup>。中国科学院物理所实现了大功率激光二极管抽运的 Nd:YVO<sub>4</sub>-KTP 声

收稿日期: 2004-02-09; 收到修改稿日期: 2004-06-23

基金项目: 国家 863 计划(2001AA311060)资助项目。

作者简介: 冯立春(1974—),男,清华大学电子工程系博士研究生,主要从事固体激光技术及器件的研究。

E-mail: fenglc97@mails.tsinghua.edu.cn

光调  $Q$  绿光激光器<sup>[8]</sup>,取得了高功率的绿光激光输出;研究了激光器在脉冲重复频率 1~30 kHz 范围内的性能,得到倍频脉冲的峰值功率在重复频率为 10 kHz 时达到最大值的实验结果,在低重复频率时峰值功率降低。文献[7]认为在低重复频率时峰值功率下降的原因是由于自发辐射引起的上能级集居数降低,但并未对此解释给出理论证明和实验验证。本文研究了激光二极管端面抽运的 Nd:YVO<sub>4</sub>-KTP 腔内倍频声光调  $Q$  激光器,在 1~100 kHz 的宽重复频率范围内,平均功率、脉冲宽度和峰值功率与重复频率的关系,与文献[7]的结果进行了比较,并对实验结果进行了分析。

## 2 实验装置

实验装置如图 1 所示。谐振腔采用平-凹结构,腔镜  $M_1$  直接镀在 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的抽运端, $M_1$  对 808 nm 光高透,对 1064 nm 光和 532 nm 光高反;Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的另一面及 KTP 晶体和声光  $Q$  开关两端面镀对 1064 nm 和 532 nm 光的增透膜;输出反射镜  $M_2$  镀对 1064 nm 高反和对 532 nm 高透的介质膜。抽运源为功率 1 W 的激光二极管,其输出光经过焦距为 3 mm 的非球面透镜聚焦到 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体上。Nd:YVO<sub>4</sub> 和 KTP 晶体尺寸分别为 3 mm × 3 mm × 1 mm 和 3 mm × 3 mm × 5 mm。激光二极管、激光晶体与倍频晶体固化为一个整体,对其使用半导体制冷器进行整体控温。声光介质采用熔融石英,声光作用长度为 2 cm,换能器工作频率为 70 MHz。声光  $Q$  开关驱动器为本实验室自制,射频最大输出功率可达 7.5 W,重复频率在 1 Hz~105 kHz 可调。此驱动器大大提高了声光器件的衍射效率,提高了激光器的性能。激光器整体尺寸为 10 cm × 5 cm × 3 cm,结构非常紧凑。

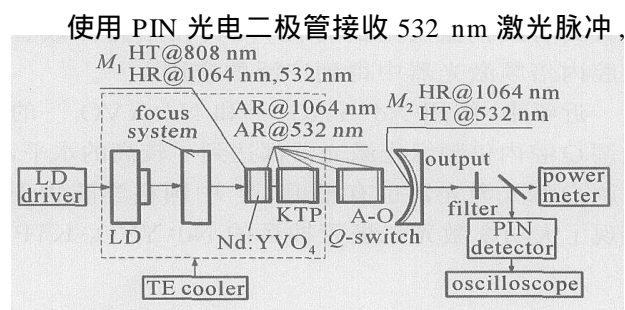


图 1 声光调  $Q$  532 nm 激光器实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of the experimental setup for the A-O  $Q$ -switched 532 nm laser

用 Agilent 54611A 型示波器测量激光脉冲的宽度和重复频率,用物料光电 LP-3A 型功率计测量平均输出功率。

## 3 实验结果及分析

### 3.1 实验结果

首先研究了激光平均输出功率与脉冲重复频率的关系,测量结果如图 2 所示。在脉冲重复频率为 50 kHz 时,得到最大平均输出功率 210.4 mW。

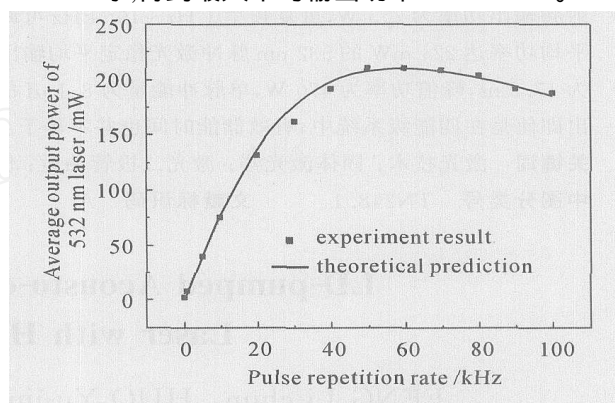


图 2 532 nm 激光输出平均功率随脉冲重复频率的变化  
Fig. 2 Average output power of 532 nm laser as a function of the  $Q$ -switched pulse repetition rate

脉冲宽度与重复频率的关系如图 3 所示。重复频率 1 Hz 到 1 kHz 时,激光脉冲宽度基本不变,为 17.2 ns 左右,当重复频率为 100 kHz 时,脉冲宽度为 33 ns。实验中,激光器在高重复频率下的输出比较稳定,输出为基横模,光斑直径为 0.16 mm,发散角为 3 mrad,光束质量因子  $M^2 = 1.42$ 。

图 4 为示波器得到的 532 nm 激光脉冲波形。图 5 为 50 kHz 重复频率下,532 nm 输出的平均功

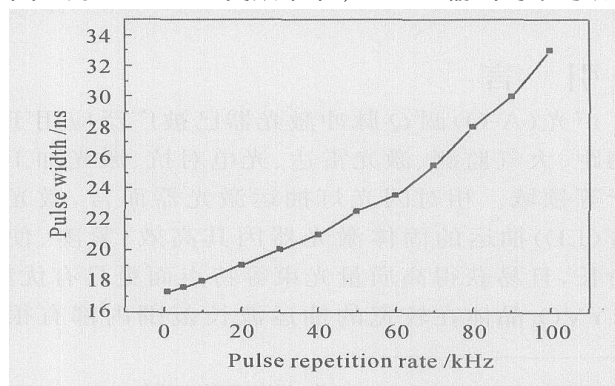


图 3 532 nm 激光脉冲宽度随重复频率的变化

Fig. 3 Pulse width of 532 nm laser as a function of the  $Q$ -switched pulse repetition rate

率与抽运功率的关系。在 50 kHz 重复频率下, 532 nm 阈值抽运功率为 200 mW, 在 1 W 的抽运功率下, 532 nm 输出功率为 224 mW, 从激光二极管输出的 808 nm 抽运光到 532 nm 绿光的总光-光转换效率为 22.4%, 高转换效率很大程度上得益于系统中的非球面耦合聚焦系统的优异性能。

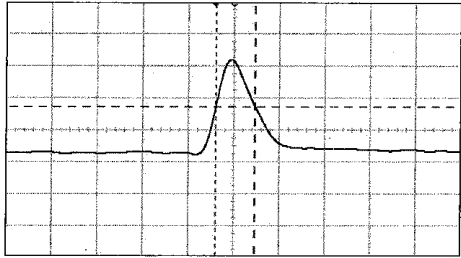


图 4 532 nm 调 Q 脉冲波形

Fig. 4 Pulse shape of 532 nm Q-switched laser

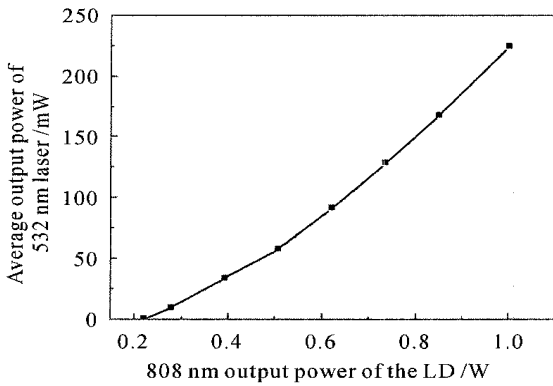


图 5 532 nm 平均输出功率与抽运功率的关系

Fig. 5 532 nm average output power as a function of LD power (50 kHz repetition rate)

### 3.2 实验结果分析

由于脉冲间隔时间为重复频率的倒数, 利用得到的平均功率与重复频率关系的数据, 就可以得到单脉冲能量与相邻激光脉冲间隔时间的关系, 如图 6 所示。结果显示, 当脉冲间隔时间较小时, 单脉冲能量随间隔时间增加增长较快, 间隔时间大于 0.1 ms 时, 单脉冲能量随脉冲间隔的增长就变得缓慢, 呈现饱和趋势。对于基频光脉冲能量随间隔时间的变化规律, 可以从下列推导得到。设四能级系统中由低到高各个能级集居数分别为  $n_0, n_1, n_2$  和  $n_3$ , 并假设  $n_1 = 0, n_3 = 0$ , 则有

$$n_0 + n_1 + n_2 + n_3 = n, \quad (1)$$

四能级系统激光上能级集居数的速率方程形式为:

$$\frac{dn_2}{dt} = -\nu N_l \cdot n - \frac{n_2}{\tau} + n_0 W_{03}, \quad (2)$$

其中  $n_2$  为激光上能级集居数,  $n$  为反转集居数, 和  $N_l$  分别为工作物质中激光的受激发射截面和腔内激光的光子数密度,  $\nu$  为工作物质中的光速,  $\tau$  为上能级自发辐射寿命,  $n_0$  为基态能级集居数,  $W_{03}$  为受激吸收跃迁几率。

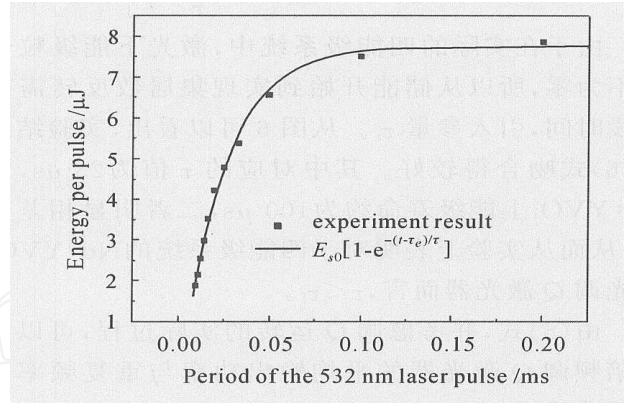


图 6 单脉冲能量与脉冲间隔时间的关系

Fig. 6 Energy per pulse as a function of time between adjacent pulses

假设在腔内 Q 开关关闭即进行储能时, 没有激光产生, 并引入参量  $p$  来表征抽运速度, 则可以得到

$$\frac{dn_2}{dt} = -\left(\frac{1}{\tau} + \frac{1}{p}\right)n_2 + \frac{n_0}{p}, \quad (3)$$

其中,  $p = 1/W_{03} = 1/(p_p \nu_p N_p)$ ,  $p$  和  $N_p$  分别为工作物质对抽运光的受激吸收截面和腔内抽运光的光子数密度,  $\nu_p$  为工作物质中抽运光的光速。

引入参量  $\tau_{eff}$ , 并令  $\tau_{eff} = (1/\tau + 1/p)^{-1}$ , 假设储能开始时刻即  $t = 0$  时, 激光上能级集居数近似为 0, 则得到上能级集居数随储能时间  $t$  变化的解析式为

$$n_2 = \frac{\tau}{\tau + p} \cdot n_0 \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_{eff}}\right) \right], \quad (4)$$

因为前面已经假设激光下能级集居数  $n_1$  为 0, 故反转集居数  $n$  等于  $n_2$ , 而基频光脉冲能量与  $n$  直接相关, 假设基频光脉冲输出能量接近增益介质中的总有效储能<sup>[9]</sup>, 则基频光单脉冲能量的形式为

$$E = E_0 g \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_{eff}}\right) \right], \quad (5)$$

$E_0$  为最大单脉冲能量。有文章认为(5)式中的  $g$  就是自发辐射寿命  $\tau$ <sup>[10-12]</sup>, 而此处并非如此, 这里为前面定义的  $\tau_{eff}$ , 且由  $\tau_{eff}$  的定义可以得出:  $\tau_{eff} < \tau$ 。参量  $g$  被定义为有效储能时间<sup>[13]</sup>, 有效储能时间被认为与抽运条件和激光器设计都有关系, 而非由工作物质单独决定<sup>[14]</sup>。有效储能时间可以表明储能过程进行的快慢, 对于调 Q 激光器的设计和性能估算而

言,它是一个很有用的参量。

考虑到随脉冲间隔时间的减少,基频光单脉冲能量降低和脉冲宽度增加会带来的倍频效率降低的影响,倍频光单脉冲能量可以表示为

$$E_s = E_{s0} g \left[ 1 - \exp \left( - \frac{t - \tau}{\tau} \right) \right] \quad (6)$$

由于在实际的四能级系统中,激光下能级粒子数不为零,所以从储能开始到实现集居数反转需要一段时间,引入参量  $\tau$ 。从图 6 可以看出,实验结果与(6)式吻合得较好。其中对应的  $\tau$  值为 23  $\mu\text{s}$ ,而 Nd:YVO<sub>4</sub> 上能级寿命约为 100  $\mu\text{s}$ ,二者明显相差较大,从而从实验上表明对于四能级系统的 Nd:YVO<sub>4</sub> 声光调 Q 激光器而言,  $\tau < \tau_0$ 。

由(6)式,并考虑调 Q 运转的实际过程,可以得到倍频调 Q 激光器的平均输出功率与重复频率的关系公式

$$P_{\text{Avg}} = E_0 \cdot f \left[ 1 - \exp \left( \frac{1 - \theta f}{f} \right) \right] \quad (7)$$

式中  $\theta$  为时间量纲。影响  $\theta$  的因素包括:Q 开关开启时间的长短与其占 Q 开关重复时间的占空比、储能开始时的集居数反转情况和倍频转换效率的变化。由(7)式计算得到的调 Q 激光器平均功率随重复频率的变化曲线如图 2 中的实线所示,可以看到,理论计算值与实验结果吻合得很好,其中  $\theta$  和  $E_0$  由对实验数据的拟合得到,分别为 3  $\mu\text{s}$  和 7.8  $\mu\text{J}$ 。

利用图 6,就可以解释图 2 所呈现的实验现象:低重复频率时,脉冲的间隔周期相对较长,受储能饱和的影响,在重复频率变化时,基频光单脉冲能量变化不大,因而倍频光单脉冲能量也变化不大,所以平均功率随重复频率近似于正比增加;高重复频率时,基频与倍频单脉冲能量随重复频率增加而快速下降,综合作用的结果是平均功率随重复频率增加而稍有下降。

脉冲建立时间即脉冲前沿随重复频率的变化规律可以表示为<sup>[9]</sup>

$$T_b = K_0 / (N_i - N_{\text{th}}) \quad (8)$$

其中  $T_b$  为脉冲前沿,  $N_i$  为初始反转集居数,  $N_{\text{th}}$  为阈值反转集居数,  $K_0$  为系数。由(4)式可知,  $N_i$  随重复频率增加而减小,结合(8)式即可知脉冲前沿随重复频率的增加而变宽,而整个脉冲的宽度也随之变宽。物理过程可以解释为:随脉冲重复频率的增加,每周期内储能减少,单程增益降低,脉冲从产生到形成需要在腔内往返更多的次数,从而基频光脉冲变宽,倍频光脉冲也随之变宽。而文献[7]得到“脉冲宽度基本不

变”的结论,可能是因其激光器脉冲重复频率范围不够宽(最大重复频率为 30 kHz)所致。

腔内峰值功率与初始反转集居数的关系可以描述为<sup>[9]</sup>

$$P_p = \frac{(r - 1 - \ln r) N_{\text{th}} h\nu}{c} \quad (9)$$

其中  $r = N_i / N_{\text{th}}$ ,  $c$  为腔内光子寿命。可以看出,峰值功率是  $N_i$  的增函数,而由于  $N_i$  是随重复频率的增加而下降的,可以推出峰值功率也随重复频率的增加而下降。

图 7 为根据实验中平均功率和脉冲宽度的数据计算得到的峰值功率随重复频率变化的曲线。在重复频率 1 kHz 时,峰值功率约为 470 W;峰值功率随重复频率增加而下降。此现象的物理解释为:由于脉冲重复频率增加,带来基频光和倍频光单脉冲能量的减少;又由于脉宽的增加;两者综合作用的结果是峰值功率随重复频率增加而降低。而文献[8]的结果中,脉冲峰值功率随重复频率先增加再减小,在重复频率 10 kHz 时出现最大值。文献[8]对此现象解释为,当调 Q 的间隔周期大于晶体上能级寿命时,上能级粒子由于自发辐射而减少,从而基频光和倍频光脉冲能量也随之减小。而由(4)式可知,反转集居数随脉冲间隔时间的增加是增加的。图 7 的实验结果同样表明,532 nm 输出的峰值功率随重复频率增加是单调下降的。

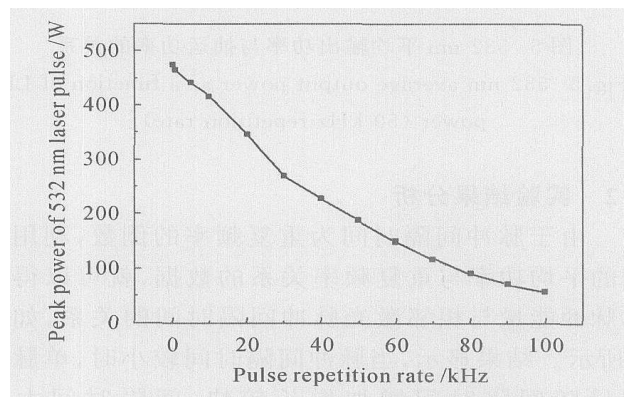


图 7 脉冲峰值功率随重复频率的变化

Fig. 7 Peak power of 532 nm pulse as a function of the Q-switched pulse repetition rate

## 4 结 论

实现了紧凑的声光调 Q 532 nm 腔内倍频激光器,激光器尺寸为 10 cm × 5 cm × 3 cm。使用 1 W 的激光二极管连续抽运,在 50 kHz 重复频率时,得到 224 mW 的平均输出功率,光-光转换效率为

22.4%。研究了 1 ~ 100 kHz 重复频率范围内, 激光器平均功率、脉冲宽度和峰值功率与重复频率的关系, 结果显示脉冲峰值功率随重复频率增加是单调下降的, 并给出了相应的解释。提出了单脉冲能量和平均功率随重复频率变化的一般公式, 依据此公式进行的计算与实验结果吻合得较好。同时提出并实验验证了, 即使在四能级系统中, 表征储能速度的有效储能时间也并不等于上能级寿命。

### 参 考 文 献

- Du Chenlin, Liu Junhai, Wang Zhengping *et al.*. LD-pumped acousto-optic  $Q$ -switched Nd:YVO<sub>4</sub> laser with high repetition rates and short pulse width [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(6): 489 ~ 491  
杜晨林, 刘均海, 王正平等. LD 抽运声光调  $Q$  高重复频率短脉冲宽 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器 [J]. 中国激光, 2002, **A29**(6): 489 ~ 491
- Zhang Hengli, Hou Wei, Xu Zuyan *et al.*. Diode pumped high repetition rate  $Q$ -switched Nd:YVO<sub>4</sub> 1342 nm laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(1): 11 ~ 15  
张恒利, 侯 玮, 许祖彦等. 激光二极管抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体声光调  $Q$  1342 nm 激光器 [J]. 中国激光, 2000, **A27**(1): 11 ~ 15
- Yang Chengwei, Huo Yujing, Yin Xiaodong *et al.*. Experimental study on LD pumped Nd:YVO<sub>4</sub> laser passively  $Q$ -switched by Cr<sup>4+</sup>:YAG[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(1): 1 ~ 4  
杨成伟, 霍玉晶, 尹晓东等. 激光二极管抽运 Cr<sup>4+</sup>:YAG 被动调  $Q$  Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器的实验研究 [J]. 中国激光, 2004, **31**(1): 1 ~ 4
- Susumu Konno, Shuichi Fujikawa, Koji Yasui. Highly efficient 68-W green-beam generation by use of an intracavity frequency-doubled diode side-pumped  $Q$ -switched Nd:YAG rod laser [J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(27): 6401 ~ 6404
- Eric C. Honea, Christopher A. Ebberts, Raymond J. Beach *et al.*. Analysis of an intracavity-doubled diode-pumped  $Q$ -switched Nd:YAG laser producing more than 100 W of power at 0.532  $\mu$ m [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(15): 1203 ~ 1205
- Yung-fu Chen. High-power diode-pumped  $Q$ -switched intracavity frequency-doubled Nd:YVO<sub>4</sub> laser with a sandwich-type resonator [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(15): 1032 ~ 1034
- Junying Wang, Quan Zheng, Qinghua Xue *et al.*. Diode-pumped, Cr:YAG passively  $Q$ -switched and mode-locked Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP green laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(10): 604 ~ 605
- Li Jian, Lu Xing-qiang, Hou Wei *et al.*. High-power diode-pumped high-repetitive acousto-optic  $Q$ -switched intracavity frequency-doubled Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP green laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(12): 1063 ~ 1066  
李 健, 卢兴强, 侯 玮等. 大功率 LD 抽运 Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP 声光调  $Q$  绿光激光器 [J]. 中国激光, 2000, **A27**(12): 1063 ~ 1066
- John J. Degnan. Theory of the optimally coupled  $Q$ -switched laser [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1989, **25**(2): 214 ~ 220
- Anthony E. Siegman. Lasers [M]. Sausalito, CA: University Science Books, 1986. 1004 ~ 1040
- Hamid Hemmati, James R. Lesh. High repetition-rate  $Q$ -switched and intracavity doubled diode-pumped Nd:YAG laser [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1992, **28**(4): 1018 ~ 1020
- Wang Shiyu, Guo Zhen, Wen Jianguo *et al.*. CW diode laser pumped  $Q$ -switched high repetition rate Nd:YAG laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(11): 1467 ~ 1472  
王石语, 过 振, 文建国等. 连续激光二极管抽运的调  $Q$  高重复频率 Nd:YAG 激光器研究 [J]. 光学学报, 2000, **20**(11): 1467 ~ 1472
- Tracy S. Kubo, Thomas J. Kane. Diode-pumped laser at five eye-safe wavelengths [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1992, **28**(4): 1033 ~ 1040
- C. D. Nabors.  $Q$ -switched operation of quasi-three-level lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1994, **30**(12): 2896 ~ 2901