

文章编号: 0253-2239(2008)03-0502-05

声光调 Q 的 Nd:YVO₄ 晶体 1342 nm 激光器

巩马理 陆成强*

(清华大学精密仪器与机械学系, 北京 100084)

摘要 报道了采用光纤耦合激光二极管(LD)模块端面抽运 Nd:YVO₄ 晶体实现高功率、高重复频率声光调 Q 1342 nm 波长的激光输出, 以及采用考虑增益频谱分布的调 Q 速率方程模型仿真研究该脉冲激光器的结果。在激光器注入总功率 40 W 的情况下, 可得到最高工作重复频率 100 kHz; 在 50 kHz 重复频率工作条件下, 可得到 11.0 W 的平均输出功率及稳定的脉冲输出。应用与介质增益频谱相关的调 Q 速率方程模型对该脉冲激光器进行了仿真研究, 得到了脉冲宽度、脉冲峰值功率、脉冲建立时间等计算结果, 还给出了输出在频谱上的分布以及谱宽, 并与实验结果进行了比较。考虑增益频谱分布的调 Q 速率方程模型不仅可以应用于分析、设计脉冲激光器的频谱, 而且由于考虑了增益在频谱上的实际分布, 基于该模型的仿真计算可以获得比传统单频调 Q 速率方程更为接近实际的结果。

关键词 激光器; 1342 nm 激光器; 声光调 Q; Nd:YVO₄ 晶体; 速率方程

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A

Acousto-Optically Q-Switched 1342 nm Laser with Nd:YVO₄ Crystals

Gong Mali Lu Chengqiang

(Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract A high-power high-repetition-rate acousto-optically Q-switched 1342 nm laser with double Nd:YVO₄ crystals pumped by fiber-coupled laser diodes and simulated results based on Q-switched rate equations considering gain distribution on spectrum are presented. With total 40 W pump power incidence, the highest pulse repetition rate of 100 kHz was obtained. At 50 kHz repetition rate, average output power higher than 11 W and rather stable pulses were achieved. With the Q-switched rate equations considering gain distribution on spectrum, not only the pulse width, peak power and build-up time can be calculated, but the output distribution on the spectrum and its width can also be given. The experimental results are compared with the simulated ones. The model can be applied to analyze and design the spectrum of the laser output, and more exact results can be obtained because the practical gain distribution on the spectrum was taken into consideration.

Key words lasers; 1342 nm laser; acousto-optic Q-switch; Nd:YVO₄ crystal; rate equations

1 引 言

1.3 μm 波段的激光器在科研、医学、工业、军事等领域具有重要的用途和广泛的应用前景^[1~3]。该波长激光接近石英光纤低色散、低损耗的波长区域, 在医疗、通信、光传感等领域具有广阔的应用。该波长激光通过倍频能获得 670 nm 红光, 可应用于激光彩显、替代氦离子激光器抽运 Cr:LiSAF 实现自锁模可调谐超快脉冲输出。通过四倍频得到 335 nm 波长的输出, 在生物、医学等方面有重要的应用。另

外, 该波长作为中红外参量激光器的抽运源与传统抽运源相比会更有效。Nd:YVO₄ 晶体由于其优异性能获得广泛的应用。该晶体材料在 $^4F_{3/2} - ^4I_{11/2}$ 能级跃迁可产生 1342 nm 波长的激光输出, 与 Nd:YAG, Nd:GdVO₄ 晶体材料相比, 该波长跃迁有较大的发射截面以及 1064 nm 的辐射强度比, 容易实现 1342 nm 波长的连续或调 Q 激光输出。对 Nd:YVO₄ 的 1342 nm 激光输出, 由于热效应^[4]及抽运极限功率^[5]的限制, 采用单个晶体单端抽运^[6,7]难以获得更大的功率, 因此采用双端抽运、多块晶体以

收稿日期: 2007-06-21; 收到修改稿日期: 2007-09-11

作者简介: 巩马理(1959-), 男, 四川人, 教授, 博士生导师, 主要从事激光技术与光电子信息工程等方面的研究。

E-mail: gongml@mail. tsinghua. edu. cn

* 通信联系人。E-mail: lucq04@mails. tsinghua. edu. cn

及主振荡-功率放大方案成为获得更高功率输出的基本途径。文献[8]报道了采用双端抽运的方式获得了超过 11 W 的功率输出;文献[9]报道了同样采用双端抽运的方式获得了超过 8 W 的基模功率输出;文献[10]使用两块晶体的结构得到最大 12 W 的连续输出。

相比较而言,对 1342 nm 波长激光进行声光调 Q 的报道较少,文献[11]曾报道了最高重复频率 15 kHz、平均功率 1.14 W、最高峰值功率 1.27 kW 的输出结果;文献[12]采用声光调 Q 及腔内 LBO 晶体倍频得到脉冲重复频率 40~350 kHz、平均功率 1.7 W 的 671 nm 波长输出。本文采用两个光纤耦合激光二极管(LD)模块端面抽运双 Nd:YVO₄ 晶体的结构,获得了高功率、高光束质量的 1342 nm 波长的声光调 Q 脉冲激光输出,并应用与介质增益频谱相关的调 Q 速率方程模型对该脉冲激光器进行了仿真研究。

2 实验装置

实验装置采用双晶体对称腔端面抽运的结构,整体腔长为 200 mm,两晶体间距为 90 mm,如图 1 所示。

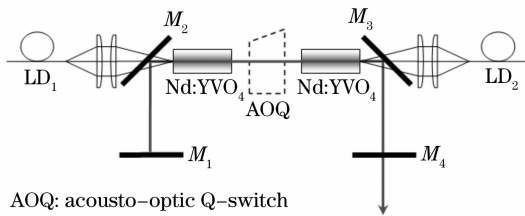


图 1 实验装置图

Fig. 1 Schematic of the experimental setup

晶体为 *a* 轴切割、掺杂原子数分数为 0.3% 的 Nd:YVO₄,尺寸为 3 mm×3 mm×12 mm,用 0.1 mm 厚的铝箔包裹放置于紫铜热沉中,紫铜热沉通水并控温在 12 °C;晶体的两端面镀 808 nm、1064 nm、1342 nm 三波增透膜,对 1064nm 的反射率小于 2% 确保该波长不会起振。抽运源为 NLight 公司生产的输出 808 nm 波长的光纤耦合激光二极管模块,最大输出功率为 30 W,耦合光纤的直径为 400 μm,数值孔径为 0.22,并通过放大比例为 1:2 的耦合成像系统耦合到晶体中。采用专用的温度控制模块监控激光二极管的工作温度以得到最佳吸收。采用四镜折叠腔型,45°入射的腔镜 M₂、M₃ 对 808 nm 的抽运波长的整体透射率大于 95%,对 1342 nm 的反射率大于 99.9%,对 1064 nm 波长也有相当大的透射

输出;全反镜 M₁ 为平平镜,对 1064 nm 波长的透射率大于 95%,对 1342 nm 波长的反射率大于 99.8%;输出镜 M₄ 为平平镜,对 1064 nm 波长的透射率大于 95%,对 1342 nm 波长的透射率为 15%。声光 Q 开关的射频频率为 27 MHz,有效尺寸 1 mm,声光晶体长度 56 mm,电功率大于 30 W,衍射效率大于 80%,脉冲调频范围 10~200 kHz;声光调 Q 装置(AOQ)置于对称腔的中心束腰位置以得到最佳调 Q 效果。光电探测器采用 NewFocus 生产的型号为 1554、带宽 12 GHz、可探测红外直到 1650 nm 波长的高速探头,再输出到 500 MHz 示波器进行测量。

3 实验结果

在晶体注入总功率 40 W 的情况下,得到最高 13.3 W 的连续输出,出光阈值 4.4 W。由理论分析所得到的 0.3% 掺杂原子数分数 Nd:YVO₄ 晶体的单端抽运功率极限为 25 W 左右^[5],施加更大抽运功率时晶体将容易出现破裂的问题。对该激光器进行声光调 Q,图 2(a)给出了典型的输出脉冲波形,图中所示的是输出重复频率 50 kHz、输出功率 8 W 时的结果,此时平均脉宽为 66 ns;激光器输出的脉冲波形存在高频尖峰现象,分析结果表明该高频尖峰频率与纵模间隔一致;图中所给的波形已经过示波器低通滤波,滤波器带宽 100 MHz。图 2(b)图给出了脉冲迭加的效果图,可看出该激光器的输出脉冲具有较好的稳定性。

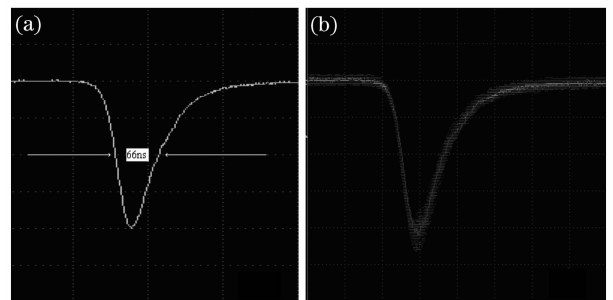


图 2 输出脉冲波形图。(a) 典型脉冲波形,(b) 脉冲叠加效果

Fig. 2 Pulse waveform. (a) Typical pulse waveform, (b) accumulated pulses

图 3 给出了 50 kHz 脉冲重复频率条件下的平均输出功率与脉冲宽度随抽运功率的变化曲线。图 3(a)还给出了该激光器连续工作时输出功率曲线。

图 4(a)给出的是在 8 W 连续输出时的光斑强度分布,图 4(b)给出的是相应的 M² 拟合曲线。此时实测 M² 值优于两倍衍射极限(竖直方向稍差),

光斑强度接近高斯型分布。

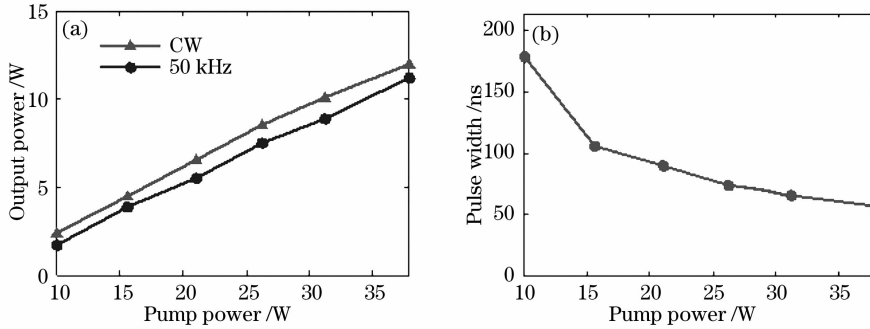


图 3 50 kHz 重复频率条件下平均输出功率(a)与脉冲宽度(b)随抽运功率变化

Fig. 3 Curves of average output power (a) and pulse width (b) at 50 kHz repetition rate versus pump power

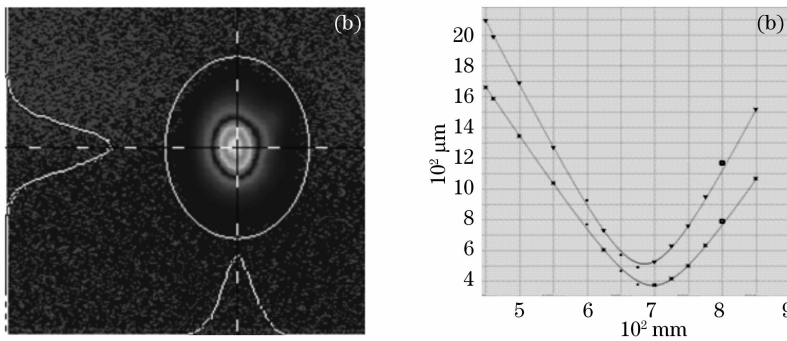


图 4 光束质量测量结果。(a)光斑强度分布, (b) M^2 值拟合曲线

Fig. 4 Measured results of beam quality. (a) Intensity distribution, (b) curve of M^2 value fitted

在连续与调 Q 输出的情况下,分别测量了在高功率输出时的频谱结构,表明 1064 nm 波长被成功抑制。

4 调 Q 速率方程仿真

首先把速率方程进行拓展,使之可以适合于处理多晶体的情况,其基本思想是对应每个晶体各建立一个反转粒子数方程,全部晶体的反转粒子数之和满足光子数速率方程。描述反转粒子数 $N_i(t)$ (i 为整数,用以标识各晶体)演化的速率方程如下:

$$\frac{dN_i(t)}{dt} = \frac{P_a}{h\nu_p} - \frac{N_i(t)}{\tau_i} - N_i(t) \sum_j B_j M_j(t), \quad (1)$$

式中第一项代表该晶体由抽运源增加的反转粒子数, P_a 为增益介质吸收的有效抽运功率, h 为普朗克常数, ν_p 为抽运光频率;第二项代表因自发辐射而减少的反转粒子数, τ_i 为自发辐射寿命;第三项代表因受激辐射而减少的反转粒子数。腔内总的反转粒子数 $N(t) = \sum N_i(t)$ 。

考虑增益频谱分布的调 Q 速率方程基本思想是把激光增益介质的谱宽以一定带宽为单位划分为若干频带,单一频带内的光子数满足通常的光子数演

化方程,全部频带内的光子数之和满足反转粒子数演化方程。描述频带内光子数 $M_j(t)$ (j 为整数,用以标识各频带)演化的速率方程如下:

$$\frac{dM_j(t)}{dt} = B_j M_j(t) \sum_i N_i(t) - \frac{\gamma + \gamma_Q(t)}{\tau_R} M_j(t) + A_j \sum_i N_i(t), \quad (2)$$

式中第一项代表受激发射过程, $B_j = \sigma_j c / V_m$ 为与频率相关的受激发射系数,与受激发射截面成正比。第二项代表损耗,包括恒量损耗、有用输出损耗及 Q 开关损耗, τ_R 为腔内环程时间, $\gamma = -\ln[(1-l_c)(1-l_o)]$ 为腔内环程损耗; $\gamma_Q(t)$ 为 Q 开关的损耗函数。第三项代表自发发射,系数 $A_j = B_j \tau_R$ (为与频率相关的自发发射系数。腔内总的光子数 $M(t) = \sum M_i(t)$ 。

其他参量说明如下: c 为真空中光速; V_m 为模式体积; σ_j 为与频率相关的受激发射截面,对于 Nd:YVO₄ 激光介质为高斯型函数; l_c 为除有用输出损耗外的其他损耗,如吸收损耗、衍射损耗等; l_o 为有用输出损耗; Δ 为频带宽度。

应用上述处理方法,计算了基于掺杂原子数分数为 0.3% 的 Nd:YVO₄ 介质声光调 Q 激光器的输出特性,表 1 给出了进行仿真计算所需要的参数。

计算步长设为一个环程时间,计算平均功率以及频谱功率密度分布所取的时间长度为一个脉冲周期,通过联立几百个常微分方程并采用龙格-库塔(Lunge-Kutta)法求解,得到以下仿真结果。

表 1 仿真激光器的参数

Table 1 Parameters for simulated laser

Parameters	Value
Gain bandwidth (FWHM) /GHz	300
Central wavelength of the atomic transition /m	1342.0×10^{-9}
Center wavelength of the pumping LD /m	808.5×10^{-9}
Stimulated emission cross section /m ²	4×10^{-23}
Spontaneous emission lifetime /s	120×10^{-6}
Division bandwidth /GHz	1
Output transmittance	0.15
Round-trip time /s	1.4×10^{-9}
Mode volume /m ⁻³	1×10^{-7}
Constant loss	0.01
Rise time of the AOQ /ns	50
Fall time of the AOQ /ns	50
Open time of the AOQ /ns	500
Diffraction efficiency of AOQ	0.8

图 5 给出了声光调 Q 仿真结果,相应的计算参数为:重复频率 30 kHz,吸收功率为 10 W;此时激光器的输出经过近 300 μs 的振荡已经趋于稳定。图 5(a)为脉冲输出在频谱上的分布随时间演化;图 5(b)给出了反转粒子数随时间的演化;图 5(c)为脉冲在时域

上的分布,亦即实时功率,计算上通过把一个周期内不同频谱成分上的功率相加得到,内插小图为声光 Q 开关的调制损耗,Q 开关在时间 $t = 316.67 \mu\text{s}$ 时打开;图 5(d)为脉冲在频谱上的分布,计算上通过把一个周期内不同时间上的功率相加得到。计算得到的平均输出功率为 4.0 W,平均效率 40.0%,脉冲宽度 57.4 ns,脉冲建立时间 420.3 ns,频谱宽度 35 GHz。

图 6 给出了在 30 kHz 重复频率条件下,对应实验模型仿真计算得到的提取效率、峰值功率、脉冲宽度、频谱宽度随晶体吸收功率的变化与实验结果的比较。图 6 中实线为仿真结果,星号代表实验测量结果。通过对实验结果的初步分析,所设计的激光器从激光二极管输出的抽运光到晶体吸收的有效吸收效率约为 60%,图中实验结果已考虑该效率。

从上述比较可以看出实验结果与仿真结果在一定程度上基本相符。对于脉冲宽度与峰值功率偏离理论曲线相对较大的原因,认为是随着抽运水平的提高,实际激光器的模体积增大,导致受激发射系数变小,因此使脉宽变长、峰值功率降低。特别对于 1342 nm 波长输出,热效应与 1064 nm 相比更为显著;因此,修正模体积与抽运水平的关系是获得更精确仿真结果的必然途径。

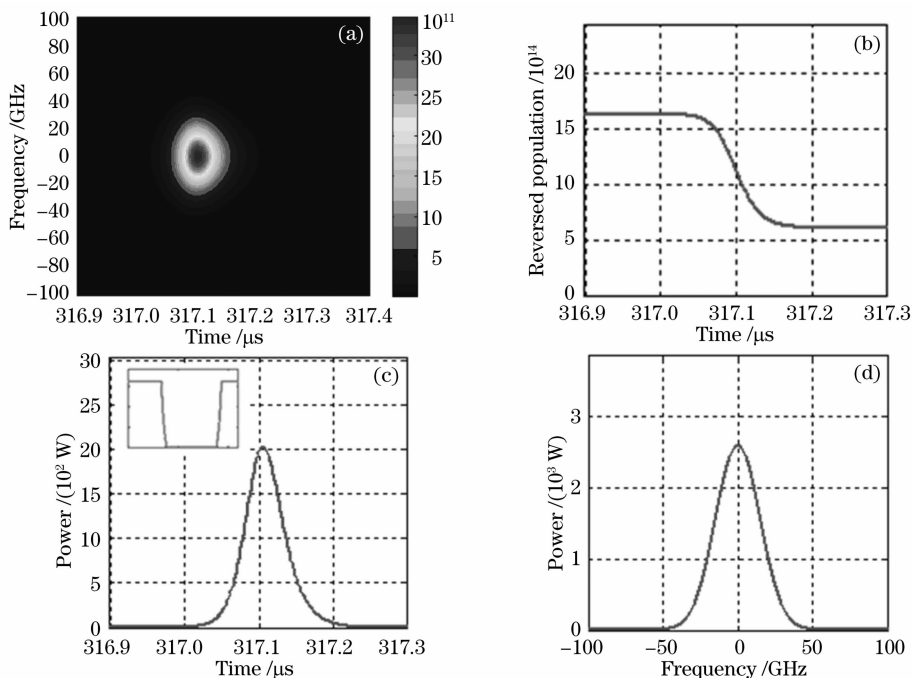


图 5 声光调 Q 仿真结果

Fig. 5 Simulated results for 1342 nm acousto-optically Q-switched laser

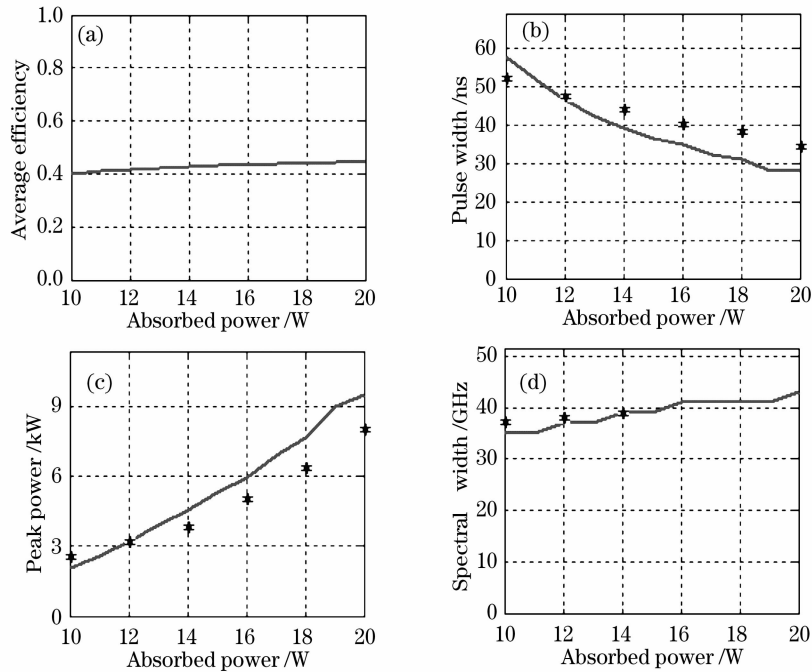


图 6 仿真结果与实验结果比较。(a) 平均输出效率, (b) 脉冲宽度, (c) 峰值功率, (d) 频谱宽度

Fig. 6 Comparison of simulated and experimental results. The solid line denotes the simulated results, the asterisk denotes the experimental results. (a) Average efficiency, (b) pulse width, (c) pulse peak power, (d) spectral width

5 结 论

基于双 Nd:YVO₄ 晶体及激光二极管端面抽运的结构,得到了高功率、高重复频率、高光束质量的 1342 nm 波长的声光调 Q 激光输出。提出了考虑增益频谱分布的调 Q 速率方程模型用于仿真研究调 Q 激光器的工作特性,仿真结果与实验结果具有较好的一致性。这不仅验证了该模型的正确性,同时也表明可应用于声光调 Q 脉冲激光器的频谱分析与设计。提出的模型经过适当修改同样适用于电光调 Q、被动调 Q 以及增益开关等脉冲工作的激光器。需要特别说明的是,计算过程都认为模体积不变,这与实际情形有一定的误差,更准确的模型应当考虑到模体积对抽运水平的依赖关系。由此还需要将光束质量与调 Q 激光器工作特性联系起来,甚至考虑热效应对调 Q 特性的影响,这些有待后续的研究。

参 考 文 献

- Peng Li, Yufei Li, Yuming Sun *et al.*. Study of passive Q-switching for flash-lamp-pumped 1.34 μm Nd:GdVO₄ laser[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(12): 718~721
- Li Haifeng, Zhou Rui, Zhao Pu *et al.*. 1386 nm continuous wave output from laser diode end-pumped 1386 nm Nd:YVO₄ laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7): 1069~1072
李海峰,周睿,赵璞等. 激光二极管端面抽运 Nd:YVO₄ 实现 1386 nm 连续波激光输出[J]. *光学学报*, 2006, **26**(7): 1069~1072
- Ma Ying, Peng Xianchu. Red and blue light generations in a periodically poled LiTaO₃ by 1342nm laser[J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(2): 262~264
马莹,彭显楚. 1342 nm 激光通过周期极化钽酸锂产生红光和蓝光的研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(2): 262~264
- M. E. Innocenzi, H. T. Yura, C. L. Fincher *et al.*. Thermal modeling of continuous-wave end-pumped solid-state lasers[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **56**(19): 1831~1833
- Y. F. Chen. Design criteria for concentration optimization in scaling diode end-pumped lasers to high powers: influence of thermal fracture[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1999, **35**(2): 234~239
- Zhang Yuping, Zheng Yi, Zhang Huiyun *et al.*. A laser-diode-pumped 7.36 W continuous-wave Nd:YVO₄ laser at 1342 nm[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2006, **23**(2): 363~365
- Y. F. Chen, L. J. Lee, T. M. Huang *et al.*. Study of high-power diode-end-pumped Nd:YVO₄ laser at 1.34 μm : influence of auger upconversion[J]. *Opt. Commun.*, 1999, **163**: 198~202
- Aiyun Yao, Wei Hou, Yupeng Kong *et al.*. Double-end-pumped 11-W Nd:YVO₄ cw laser at 1342 nm[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2005, **22**(10): 2129~2133
- Hamish Ogilvy, Michael J. Withford, Peter Dekker *et al.*. Efficient diode double-end-pumped Nd:YVO₄ laser operating at 1342 nm[J]. *Opt. Exp.*, 2003, **11**(19): 2411~2415
- Alberto Di Lieto, Paolo Minguzzi, Vittorio Magni. High-power diffraction-limited Nd:YVO₄ lasers at 1.34 μm with compact resonators[C]. *Proc. SPIE*, 2003, **4969**: 58~69
- Zhang Hengli, Hou Wei, Xu Zuyan. Diode pumped high repetition rate Q-switched Nd:YVO₄ 1342 nm laser[J]. *Chin. J. Lasers*, 2000, **A27**(1): 11~15
张恒利,侯玮,许祖彦. 激光二极管抽运 Nd:YVO₄ 晶体声光调 Q 1342 nm 激光器[J]. *中国激光*, 2000, **A27**(1): 11~15
- Hamish Ogilvy, Michael J. Withford, Peter Dekker *et al.*. High repetition rate, Q-switched and intracavity frequency doubled Nd:YVO₄ laser at 671 nm[J]. *Opt. Exp.*, 2004, **12**(15): 3543~3547