

基于碳纳米管的 Tm:YAP 2 μm 脉冲激光 特性实验研究

曲遵世¹ 马宝民² 刘 杰¹

(¹ 山东师范大学物理与电子科学学院, 山东 济南 250014)
(² 山东大学信息科学与工程学院, 山东 济南 250100)

摘要 采用结构简单、紧凑的直线腔设计,用单壁碳纳米管(SWCNT)为饱和吸收体,实现了激光二极管(LD)抽运 Tm:YAP 晶体的 2 μm 波段被动调 Q 和调 Q 锁模(QML)脉冲激光运转。当腔长为 30 mm 时,实现了稳定的 2 μm 被动调 Q 激光输出,抽运功率为 8.64 W 时,最大平均输出功率为 507 mW,最高重复频率 26.91 kHz,最窄脉宽 262 ns,相应的单脉冲能量 18.8 μJ 。腔长增加到 80 mm 时,得到调 Q 锁模激光运转,最大平均输出功率和调 Q 包络脉冲的最高重复频率分别为 387 mW 和 34.61 kHz,调 Q 包络下锁模脉冲的重复频率为 1.87 GHz。

关键词 激光器; 2 μm 被动调; 调 Q 锁模; 碳纳米管吸收体; Tm:YAP 晶体; 激光二极管抽运

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.1102009

Research on Pulse Laser Characteristics for 2 μm Tm:YAP Laser Based on Carbon Nanotube Absorber

Qu Zunshi¹ Ma Baomin² Liu Jie¹

(¹ College of Physics and Electronics, Shandong Normal University, Jinan, Shandong 250014, China)
(² School of Information Science and Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250100, China)

Abstract The carbon nanotube as a saturable absorber is used in the passively Q-switched and Q-switched mode-locking (QML) of a laser diode (LD) pumped Tm:YAP operating at 2 μm . As high as 507 mW average output power of Q-switched pulses laser is obtained with a pump power of 8.64 W at the cavity length of 30 mm. The maximum pulse energy, pulse width and pulse repetition frequency are 18.8 μJ , 262 ns and 26.91 kHz respectively. When the whole cavity length increases to 80 mm, the QML laser is obtained. The maximum average output power and the pulse repetition frequency of Q-switched envelope are 387 mW and 34.61 kHz, respectively, while the pulse repetition frequency of the mode locking is 1.87 GHz.

Key words lasers; 2 μm passively Q-switched; Q-switched mode-locking; carbon nanotube absorber; Tm:YAP crystal; laser diode-pumped

OCIS codes 140.3380; 140.3480; 140.3540; 140.3580

1 引 言

激光二极管(LD)抽运 2 μm 波段固体激光器除了具有效率高、结构紧凑、长寿命、性能稳定、光束

质量好等优点外,还具有良好的大气穿透性和人眼安全特性,因此,在军事、工业、医学和科研等领域得到了广泛应用。近 10 年来,掺有三价稀土离子

收稿日期: 2011-07-07; 收到修改稿日期: 2011-08-13

基金项目: 国家自然科学基金(61078032)和总装重点实验室项目(9140C0403011106)资助课题。

作者简介: 曲遵世(1984—),男,硕士研究生,主要从事半导体激光抽运超短脉冲激光器方面的研究。

E-mail: zunshi77@126.com

导师简介: 刘 杰(1963—),教授,主要从事全固态激光技术和非线性光学等方面的研究。

E-mail: jieliu@sdu.edu.cn(通信联系人)

Tm^{3+} 、 Ho^{3+} 的固体激光器引起人们的很大兴趣^[1~6]。这种激光器被认为是人眼安全远程探测系统,如激光测距机、相干多普勒测风雷达、差分吸收雷达等系统的理想光源^[7~9],并且它还是获得 3~5 μm 波段光学参量振荡器激光输出的理想抽运源^[10]。2 μm 波段室温运转的固体激光器由于它的应用前景非常广阔,因此成为近年来国内外研究的热点之一。

$\text{Tm}:\text{YAP}$ 晶体是近年来引起广泛关注的一种 2 μm 波段激光材料,是很重要的中红外可调谐激光晶体。 $\text{Tm}:\text{YAP}$ 晶体中,基质 YAP 所具有的各向异性特点可抑制由于热负荷引起的双折射效应,而且晶体中 Y—O 键长为 0.262 nm,较之 YAG 晶体中 Y—O 键长(0.245 nm)更大^[11],有利于 Tm^{3+} 的掺入,也有可能实现不同取向的 $\text{Tm}:\text{YAP}$ 晶体输出不同的 2 μm 波长激光的特点。 $\text{Tm}:\text{YAP}$ 晶体光谱和输出特性的研究结果表明, $\text{Tm}:\text{YAP}$ 晶体具有掺杂浓度高、发射截面大、偏振激光输出及阈值低、荧光寿命长等优点,适于激光二极管抽运,是具有潜在用途的激光材料^[12,13]。由于饱和吸收体的限制,2 μm 波段附近的 $\text{Tm}:\text{YAP}$ 被动调 Q 和调 Q 锁模(QML)特性研究较少。文献[14]利用 InGaAs/GaAs 作为吸收体,首次得到了 $\text{Tm}:\text{YAP}$ 晶体的被动调 Q 脉冲输出。

近年来,一种新型单壁碳纳米管饱和吸收体(SWCNT-SA)逐渐被用来作为固体和光纤激光器锁模和调 Q 的吸收体,这种吸收体具有较快的恢复时间、化学性质稳定、较宽的光谱等优点。作为饱和吸收体,它的制作方法比较简单,常用的方法有喷雾法、旋转涂布法、蒸发法等。另外,其制作成本非常低,也不像半导体可饱和吸收镜那样有一定的毒性。特别是由于它具有从 1~2 μm 的吸收带宽,所以可以用于实现 2 μm 波段脉冲激光输出。目前单壁碳纳米管饱和吸收体在 1.0 μm 和 1.5 μm 波段已经有大量应用^[15~17],在 2 μm 波段也有相关报道^[18,19]。

本文采用结构简单紧凑的直线腔设计,用单壁碳纳米管作为饱和吸收体,实现了 LD 抽运 $\text{Tm}:\text{YAP}$ 晶体的 2 μm 波段被动调 Q 和调 Q 锁模脉冲激光运转。在腔长为 30 mm 时,得到了稳定的被动调 Q 脉冲激光输出。腔长增加到 80 mm 时,得到调 Q 锁模激光运转,调 Q 包络下锁模脉冲的重复频率高达 1.87 GHz。并对相应的激光特性参数做了研究。

2 单壁碳纳米管饱和吸收体的制备

实验所用碳纳米管粉末材料从 Golden Innovation 商业公司购买。单壁碳纳米管的直径约 1~5 μm 。为了使单壁碳纳米管溶解到水中,经过了 $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{HNO}_3$ 处理。然后把 1 mg 单壁碳纳米管粉末放入 10 mL 质量分数为 0.1% 的十二烷基硫酸钠(SDS)水溶液中,这里 SDS 被用作表面活性剂。为使单壁碳纳米管水分散更好,用超声波振荡器将单壁碳纳米管分散液超声处理 10 h。之后再离心分离出分散较好的单壁碳纳米管分散液。然后,将经过稀释的单壁碳纳米管分散液倒入插有亲水性石英衬底的聚苯乙烯容器中。再将该容器置于桌面在大气环境下进行缓慢蒸发,两周后蒸发完成,石英衬底两面都附着有碳纳米管。用近红外分光光度计来测量单壁碳纳米管吸收体的线性吸收波长,结果如图 1 所示。

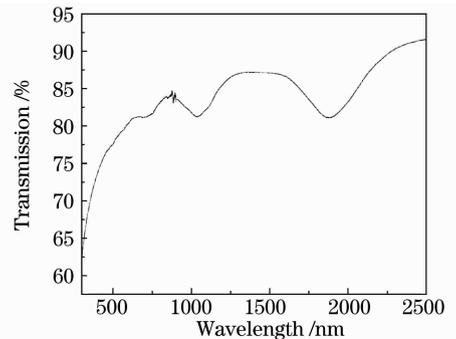


图 1 SWCNT-SA 的吸收谱

Fig. 1 Absorption spectrum of SWCNT-SA

3 $\text{Tm}:\text{YAP}$ 的调 Q 脉冲特性

激光二极管抽运 $\text{Tm}:\text{YAP}$ 激光器实验装置如图 2 所示,抽运源是光纤耦合输出的半导体激光器,为了使其发射波长与激活离子的吸收峰更好地吻合,通过调节 LD 的温度使其发射波长稳定在 795 nm 附近。抽运源的光纤芯径为 400 μm ,数值孔径(NA)为 0.22,最大输出功率为 30 W。抽运光束被一对聚焦比例为 1:0.5 的耦合透镜组准直聚焦到晶体上,聚焦后光斑半径为 100 μm 。实验采用的 $\text{Tm}:\text{YAP}$ 中 Tm^{3+} 的掺杂原子数分数为 5%,尺寸为 3 mm×3 mm×5 mm。为了有效冷却晶体,用铝箔包裹晶体固定于紫铜冷却片内,并用循环水系统对紫铜片进行冷却,使晶体表面温度维持在 14 $^{\circ}\text{C}$ 左右。输入镜是曲率半径为 100 mm 的凹面镜,其前后表面均镀有 780~810 nm 的增透膜,后端面镀有

1900~2000 nm 的高反膜。输出镜是一个透射率为 2% 的平镜。单壁碳纳米管紧贴输出镜放置。通过 ABCD 矩阵的计算,腔长为 3 cm,这样可以保证腔的稳定性,还可以在单壁碳纳米管吸收体位置上得到小的光斑半径,约为 $68\ \mu m$ 。

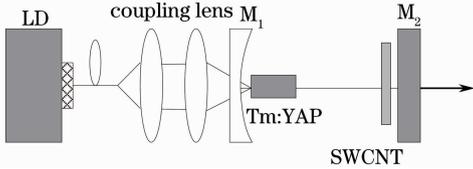


图 2 实验装置图

Fig. 2 Schematic figure of the experiment setup

采用以色列 OPHIR(30A-SH-V1)激光功率计测量激光输出功率,首先测量了连续激光(CW)输出功率(未加吸收体时),在抽运功率为 8.64 W 时,得到最大的输出功率为 637 mW。单壁碳纳米管紧贴输出镜插入后,得到了稳定的调 Q 脉冲激光运转,测量调 Q 激光的平均输出功率,在抽运功率为 8.64 W 时,最大输出功率为 507 mW。连续激光输出功率和调 Q 平均输出功率与所对应的抽运功率的实验曲线如图 3 所示。从图中可以看出,因为有插入损耗,所以调 Q 输出功率比连续输出功率小,输出功率随抽运功率的增加一直在增大,没有出现饱和现象,但是出于保护晶体考虑,没有继续增大抽运功率。实验中用上升时间为 250 ps 的 ET-3500 快速光电探测器接收产生的激光脉冲,并用 Tektronix 公司生产的带宽为 1 GHz 的数字示波器(Tektronix TDS5104)记录各阶段的波形。图 4 是脉冲宽度和重复频率随抽运功率的变化。随着抽运功率的增加,脉冲宽度从 556 ns 减小到 262 ns,重复频率从 12.97 kHz 增加到 26.91 kHz。在抽运功率为 8.64 W 时,最窄脉宽为 262 ns,相应的重复频

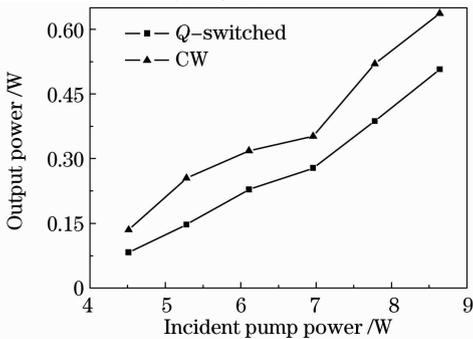


图 3 连续激光输出功率和调 Q 平均输出功率与所对应的抽运功率的实验曲线

Fig. 3 Variation of the output power with the incident pump power for CW and the Q-switched laser

率为 26.91 kHz。从图 5 可以知道,单脉冲能量随着抽运功率的增加而增大,最大单脉冲能量为 $18.8\ \mu J$,从而可以得到最大峰值功率为 71.7 W。图 6 是从示波器得到的在抽运功率为 8.64 W 时的调 Q 脉冲波形,脉冲宽度为 262 ns,插图为相应的脉冲序列。用光谱仪(AvaSpec-NIR256-2.5)测得调 Q 脉冲激光的中心波长为 2011 nm,光谱半峰全宽为 21 nm。

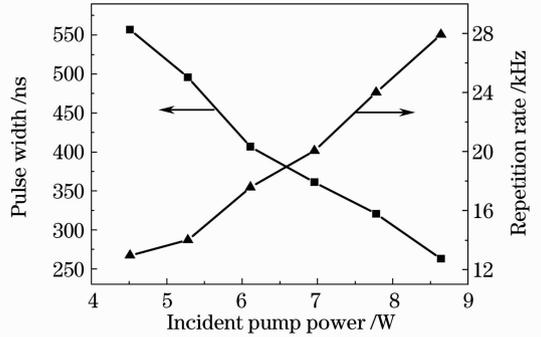


图 4 调 Q 脉冲宽度和重复频率随抽运功率的变化

Fig. 4 Q-switched pulse width and repetition rate versus incident pump power

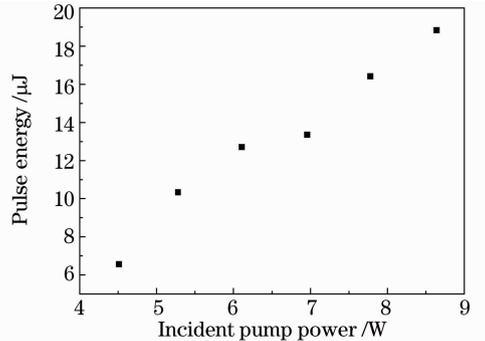


图 5 调 Q 单脉冲能量随抽运功率的变化

Fig. 5 Q-switched pulse energy versus incident pump power

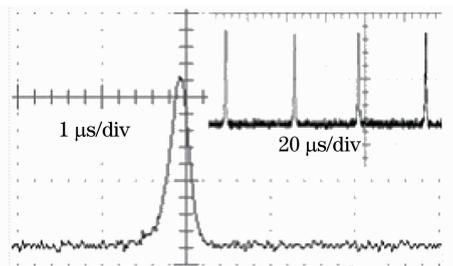


图 6 抽运功率为 8.64 W 时的调 Q 脉冲波形

Fig. 6 Temporal profile of Q-switched with $1\ \mu s$ at the incident pump power 8.64 W

4 $Tm:YAP$ 的调 Q 锁模特性

为了实现调 Q 锁模,入射到饱和吸收体上的激

光功率密度要足够强,所以单壁碳纳米管吸收体上的光斑半径应该足够小。增加腔长可以减小吸收体上的光斑半径,通过采用 ABCD 矩阵的计算,可知当腔长增加到 80 mm 时,单壁碳纳米管上的光斑半径可减小到 58 μm ,得到了调 Q 锁模运转,锁模调制深度大约为 80%。图 7 给出了连续激光输出功率(未加吸收体时)和调 Q 锁模平均输出功率随抽运功率的变化曲线。从图中可以看出最大连续激光输出功率和调 Q 锁模激光平均功率分别是 606 mW 和 387 mW。随着抽运功率的增加没有出现饱和现象,同样出于保护激光晶体考虑,没有继续加高抽运功率。当抽运功率从 4.51 W 增加到 8.64 W 时,调 Q 脉冲包络的重复频率从 15.54 kHz 增加到 34.61 kHz,从而可以得到最大的调 Q 单脉冲能量为 11.2 μJ 。图 8 为从示波器上采集到的在抽运功率为 8.64 W 时的调 Q 锁模脉冲波形,Q 包络的脉冲宽度大约为 800 ns,插图是其包络里展开的锁模波形。根据谐振腔长度可以算出调 Q 包络下锁模脉冲的重复频率为 1.87 GHz。

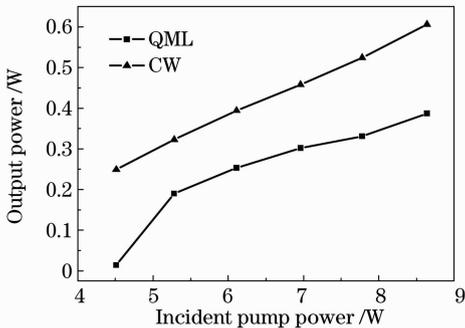


图 7 连续激光输出功率和调 Q 锁模功率随抽运功率的变化曲线

Fig. 7 Variation of the output power with the incident pump power for the CW and Q-switched mode-locking laser

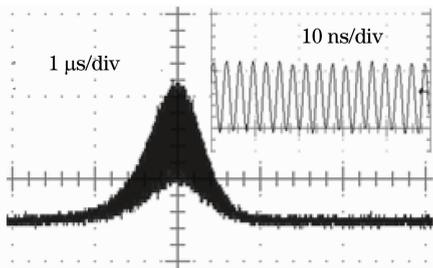


图 8 抽运功率为 8.64 W 时调 Q 锁模脉冲波形

Fig. 8 Temporal trace of the Q-switched mode-locking laser pulses at the incident pump power of 8.64 W

利用公式 $t_r = \sqrt{t_m^2 - t_p^2 - t_o^2}$, 可以估算出锁模脉冲的宽度^[20]。其中 t_r 是实际锁模脉冲的上升时间,

t_m 是测量得到的脉冲上升时间, t_p 是探测器的上升时间, t_o 是示波器的上升时间。一般来说, 示波器的上升时间满足 $t_o W_B = 0.35 - 0.4$, W_B 是示波器的带宽, 实验中使用的示波器带宽是 1 GHz, 所以对应的 t_o 约为 350 ps, 使用快速光电探测器的上升时间 t_r 为 250 ps, 从图 8 中示波器上显示的脉冲宽度, 可以推算出 t_m 约为 800 ps。根据前面公式可得实际锁模脉冲的上升时间约为 670 ps, 根据上升时间的定义和脉冲的对称性, 可以认为锁模的脉冲宽度约为上升时间的 1.25 倍, 即锁模脉冲的宽度约为 840 ps。利用光谱仪测得调 Q 锁模的中心波长是 2017 nm, 光谱半峰全宽为 25 nm。若进一步优化折叠谐振腔结构和单壁碳纳米管吸收体的参数, 有望获得 Tm:YAP 晶体的 2 μm 波段连续锁模激光运转。

5 结 论

采用结构简单、紧凑的直腔, 用单壁碳纳米管作为饱和吸收体, 实现了 LD 抽运 Tm:YAP 晶体的 2 μm 波段调 Q 和调 Q 锁模脉冲激光运转。当腔长为 30 mm 时, 实现了稳定的 2 μm 被动调 Q 激光输出, 抽运功率为 8.64 W 时, 最大平均输出功率为 507 mW, 最高重复频率 26.91 kHz, 相应的脉宽和单脉冲能量分别为 262 ns, 18.8 μJ 。用光谱仪测得调 Q 的中心波长为 2011 nm, 线宽为 21 nm。腔长增加到 80 mm 时, 得到调 Q 锁模激光运转, 最大输出功率和调 Q 包络脉冲的最高重复频率分别为 387 mW 和 34.61 kHz。调 Q 包络下锁模脉冲的重复频率为 1.87 GHz, 估算得出锁模脉冲的宽度为 840 ps。用光谱仪测得调 Q 锁模的中心波长是 2017 nm, 线宽为 25 nm。实验表明, 单壁碳纳米管作为吸收体在 2 μm 波段有很好的应用前景。下一步工作将进一步优化谐振腔结构和单壁碳纳米管吸收体的参数, 以期获得 2 μm 波段连续锁模激光脉冲输出。

致谢 感谢王勇刚博士提供的碳纳米管吸收体样品。

参 考 文 献

- 1 N. P. Barnes, W. J. Rodriguez, B. M. Walsh, Ho: Tm: YLF laser amplifiers [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1996, **13** (12): 2872~2882
- 2 B. M. Walsh, N. P. Barnes, B. D. Bartolo. The temperature dependence of energy transfer between the Tm 3F_4 and Ho 5I_7 manifolds of Tm-sensitized Ho luminescence in YAG and YLF [J]. *J. Lumin.*, 2000, **90**(1-2): 39~48

- 3 R. Gunnar, S. Knut. Modeling of laser-pumped Tm and Ho lasers accounting for upconversion and ground-state depletion[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1996, **32**(9): 1645~1656
- 4 J. G. Wang, Z. G. Zhang, J. Z. Xu *et al.*. Spectroscopic investigation on the properties of visible and near infrared emissions in Tm³⁺, Ho³⁺ co-doped YVO₄ crystals[J]. *Chinese Phys.*, 2000, **9**(3): 210~215
- 5 C. Nagasawa, D. Sakaizawa, H. Hara *et al.*. Lasing characteristics of a CW Tm, Ho:YLF double cavity microchip laser[J]. *Opt. Commun.*, 2004, **234**: 301~304
- 6 J. Izawa, H. Nakajima, H. Hara *et al.*. Comparison of lasing performance of Tm, Ho:YLF laser by use of single and double cavities[J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(15): 1418~1421
- 7 E. Kato, H. Noguchi, M. Nagai *et al.*. Significant progress in II-VI blue green laser diode lifetime[J]. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(3): 282~284
- 8 G. J. Koch, A. N. Dharamsi, C. M. Fitzgerald *et al.*. Frequency stabilization of a Ho:Tm:YLF laser to absorption lines of carbon dioxide[J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(21): 3664~3669
- 9 G. J. Koch, M. Petros, J. Yu *et al.*. Precise wavelength control of a single-frequency pulsed Ho:Tm:YLF laser[J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(9): 1718~1721
- 10 P. A. Budni, L. A. Pomeranz, P. G. Schunemann. CW and Q-switched Ho:YAG pumped by Tm:YALO[C]. *Advanced Solid State Lasers*, 1998, **19**: 90~92
- 11 G. Neuroth, F. Wallrafen. Czochralski growth and characterization of pure and doped YAlO₃ single crystal[J]. *J. Cryst. Growth*, 1999, **198/199**(1): 435~439
- 12 Lu Yanling, Yang Yang, Wang Jun *et al.*. Spectral properties of Tm:YAP laser crystal[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(7): 968~972
陆燕玲, 杨扬, 王俊等. Tm:YAP 激光晶体光谱参数的计算[J]. *中国激光*, 2006, **33**(7): 968~972
- 13 Wang Yuezhu, Duan Xiaoming, Ke Liang *et al.*. Room temperature efficient continuous wave laser diode-end-pumped Tm:YAP laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1710~1713
王月珠, 段小明, 柯亮等. 室温下高效率连续波激光二极管端面抽运 Tm:YAP 激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1710~1713
- 14 Baoquan Yao, Yi Tian, Gang Li *et al.*. InGaAs/GaAs saturable absorber for diode-pumped passively Q-switched dual-wavelength Tm:YAP lasers [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(13): 13574~13579
- 15 H. R. Chen, Y. G. Wang, C. Y. Tsai *et al.*. High-power passively mode-locked Nd:GdVO₄ laser using single-walled carbon nanotubes as saturable absorber[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(7): 1284~1286
- 16 Ying Liu, Yonggang Wang, Jie Liu *et al.*. High power ultrafast Nd:YVO₄ laser mode locked by single wall carbon nanotube absorber[J]. *Appl. Phys. B*, 2011, **104**(4): 835~838
- 17 Chengcheng Liu, Yonggang Wang, Jie Liu *et al.*. Ultrafast Yb:Y₂SiO₅ laser investigation based on a carbon nanotube absorber [J]. *Appl. Opt.*, 2011, **50**(19): 3229~3232
- 18 W. B. Cho, A. Schmidt, J. H. Yim *et al.*. Passive mode-locking of a Tm-doped bulk laser near 2 μm using a carbon nanotube saturable absorber[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(13): 11007~11012
- 19 M. A. Solodyankin, E. D. Obraztsova, A. S. Lobach *et al.*. Mode-locked 1.93 μm thulium fiber laser with a carbon nanotube absorber[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(12): 1336~1338
- 20 Kejian Yang, Shengzhi Zhao, Guiqiu Li *et al.*. Diode-pumped passively Q-switched mode-locked c-cut Nd:GdVO₄ laser with a GaAs coupler[J]. *Opt. Mater.*, 2007, **29**(9): 1153~1158

栏目编辑: 宋梅梅