

文章编号: 0258-7025(2010)09-2384-05

# 高功率脉冲 $2\ \mu\text{m}$ 光纤主振荡功率放大器系统

徐林<sup>1</sup> 唐玉龙<sup>1</sup> 张帅<sup>1</sup> 王明建<sup>1</sup> 徐剑秋<sup>2</sup> 杭寅<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800; <sup>2</sup> 上海交通大学物理系, 上海 200240)

**摘要** 利用国内生长的 Tm:YLF 晶体实现了在波长 1910 nm 处高重复频率、短脉宽激光种子输出。晶体尺寸为  $1.5\ \text{mm} \times 6\ \text{mm} \times 20\ \text{mm}$ , 掺杂原子数分数为 2%。在腔长为 90 mm 条件下, 采用不同透射率( $T$ )和曲率半径( $R$ )的输出镜, 测得在  $T=10\%$ ,  $R=250\ \text{mm}$  时输出激光的斜率效率最高, 为 25.6%。利用高功率掺铥光纤放大器, 采用激光主振荡功率放大器(MOPA)方式, 实现了脉冲激光放大。在抽运功率为 100 W, 重复频率为 500 Hz 时, 得到峰值功率 630 kW, 单脉冲能量 63 mJ 的脉冲输出。

**关键词** 激光器; 脉冲光纤激光器; 种子注入;  $2\ \mu\text{m}$  激光; 光纤放大

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103709.2384

## High Power Pulsed $2\ \mu\text{m}$ Fiber Main-Oscillator Power-Amplifier System

Xu Lin<sup>1</sup> Tang Yulong<sup>1</sup> Zhang Shuaiyi<sup>1</sup> Wang Mingjian<sup>1</sup> Xu Jianqiu<sup>2</sup> Hang Yin<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)  
(<sup>2</sup> Department of Physics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract** High repetition rate short pulsed seed laser output at the wavelength of 1910 nm is achieved by utilizing the home-made Tm-doped YLF(Tm:YLF) crystal. The crystal size is  $1.5\ \text{mm} \times 6\ \text{mm} \times 20\ \text{mm}$ , and the doping atom fraction is 2%. With the cavity length of 90 mm, by employing different transmissions ( $T$ ) and radii ( $R$ ) of the output mirrors, the highest slope efficiency of 25.6% is obtained with  $T=10\%$  and  $R=250\ \text{mm}$ . In addition, pulsed laser is amplified based on the main-oscillator power-amplifier (MOPA) system by using high-power Tm-fiber amplifier. With the pump power of 100 W and repetition rate of 500 Hz, the laser output with the peak power of 630 kW and pulse energy of 63 mJ is obtained.

**Key words** lasers; pulsed fiber lasers; seed injection;  $2\ \mu\text{m}$  laser; fiber amplifier

## 1 引言

由于在遥测技术、激光医疗及光学参量振荡产生中红外波长方面有着广泛应用, $2\ \mu\text{m}$  固体激光器已经越来越引起关注<sup>[1,2]</sup>。Tm<sup>3+</sup> 掺杂材料在 800 nm 附近有着强的吸收带,因而适合用商业的半导体激光器抽运。氟化铥钇(YLF)是天然双折射材料,YLF 的分子式为 LiYF<sub>4</sub>,是四方晶系结构,对称性 L<sub>4</sub>C,空间群 I4<sub>1/a</sub>,YLF 晶体在紫外光谱区吸收损耗小,非线性折射系数小,非常适合三价稀土离子

(如 Tm<sup>3+</sup>, Ho<sup>3+</sup>)的掺杂,任一三价稀土离子即可取代 Y<sup>3+</sup> 格位,而无需电荷补偿。掺三价离子的 YLF 晶体具有较高的光存储容量,与 YAG 晶体相比,YLF 晶体具有较高的斜率效率和较低的阈值,热稳定方面 YLF 晶体比 YAG 晶体更好。同时 YLF 是一种低声子能材料,所以同其他基质相比有很多优点,如上转换损耗小,抗光学损伤能力较强,没有热诱发的双折射,以及输出激光线偏振能够产生并输出无退偏效应的线偏振光。此外,YLF 的折

收稿日期: 2010-04-19; 收到修改稿日期: 2010-06-06

基金项目: 国家 863 计划(2009AA03Z441)和上海市自然科学基金(10ZR1433700)资助课题。

作者简介: 徐林(1985—),男,博士研究生,主要从事固体激光器及光纤激光器等方面的研究。

E-mail: rinxulin@hotmail.com

导师简介: 徐剑秋(1969—),男,教授,博士生导师,从事高功率固体激光器尤其是中红外固体激光器技术、光纤激光器技术和非线性光学转换等方面的研究。E-mail: jqxu@siom.ac.cn(通信联系人)

射率随温度升高而降低,导致在激光器中形成负热透镜效应<sup>[3, 4]</sup>。Ho:YAG 的吸收谱与 Tm:YLF 的发射谱很好地交叠使得后者可以作为前者在 2.1  $\mu\text{m}$  波长发光的抽运源<sup>[5, 6]</sup>。相比而言, YLF 中掺杂的 Tm<sup>3+</sup> 的交叉弛豫速率比 YAG 的更快,并且同时掺杂 Tm<sup>3+</sup>/Ho<sup>3+</sup> 两种离子的 YLF 与 YAG 基质中, YLF 中 Tm<sup>3+</sup> 到 Ho<sup>3+</sup> 的能量转移速率也更快,这都使得 Tm:YLF 材料可作为 2  $\mu\text{m}$  处发光的很好的激光介质。

目前,很多研究小组都致力于 Tm:YLF 的激光性能研究,如 M. Schellhorn 等<sup>[7]</sup>报道了采用双端抽运方式获得了 192.5 W 的输出,L. Gorajek 等<sup>[8]</sup>通过插入 Loyt's filter 压缩线宽并进行声光(AO)调 Q,在重复频率为 10 Hz 时得到脉宽 22 ns,线宽小于 1 nm 的激光输出。国内虽有相关工作报道,但都基于国外的晶体材料<sup>[9, 10]</sup>。Y. Wang<sup>[11, 12]</sup>研究了 Tm, Ho 共掺的 YLF 晶体在低温下的激光性能,并依据 Tm:YLF 获得了在 1907 nm 处波长稳定、窄线宽的连续激光输出。本文采用国内生长的 Tm:YLF 晶体,实现了脉冲激光输出,并对其进行声光调 Q,得到高重复频率、短脉宽的稳定脉冲序列。在此基础上,利用掺 Tm<sup>3+</sup> 石英光纤放大器,通过激光主振荡功率放大器(MOPA)方式,获得高功率、高重复频率的 2  $\mu\text{m}$  脉冲激光输出。相对于采用微焦耳级的种子光,通过多级放大的方式,采用了具有较高功率的固体激光器为注入种子和光纤放大器组成的两级 MOPA 系统,展示出良好的可扩展性和功率提升能力,是获得高功率、高重复频率和短脉宽 2  $\mu\text{m}$  激光输出的一种潜在、有效技术路线。

## 2 晶体生长及光学特性

实验采用的 Tm:YLF 晶体由中国科学院上海光学精密机械研究所生长,利用中频电磁感应加热炉和提拉法获得了直径大于 35 mm 的原晶,晶体的掺杂原子数分数为 1%~5% 可选<sup>[13, 14]</sup>。实验中选用高纯原料 LiF, LuF<sub>3</sub>, YF<sub>3</sub>, TmF<sub>3</sub> (质量分数高于 99.99%), 采用纯 LiYF<sub>4</sub> 晶体制备生长晶体所需的籽晶,籽晶的晶轴取向为 *a* 向。通过中频电磁感应加热提拉法,生长出了透明、完整不开裂、内部无包裹物、散射少的高光学质量的 Tm:YLF,原晶的尺寸约为  $\phi 35 \text{ mm} \times 90 \text{ mm}$ ,重约 143 g。

采用 Nikon G250 光谱仪测试 2  $\mu\text{m}$  波段荧光光谱,抽运源为 790 nm AlGaAs 激光二极管,测试范围为 1600~2200 nm,分辨率 0.5 nm。Tm:YLF

晶体的荧光光谱和本次实验出光时的激光光谱如图 1 所示。可以看出,该晶体的荧光光谱较宽,在激光器没有采取选模或压缩线宽的情况下,出射激光光谱存在两个紧邻的尖峰,分别位于 1910 nm 和 1925 nm,这表明 Tm:YLF 晶体也可用作宽谱调谐激光器<sup>[15]</sup>。

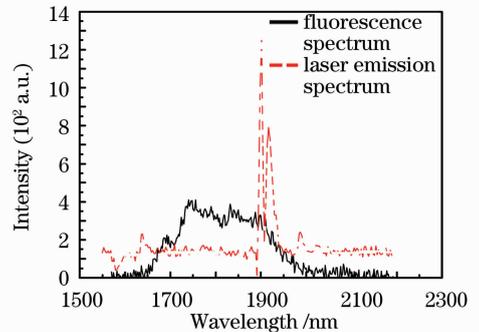


图 1 Tm:YLF 晶体的荧光光谱与激光谱

Fig. 1 Fluorescence spectrum and laser emission spectrum for Tm:YLF crystal

## 3 实验装置

此次生长的 Tm:YLF 晶体掺杂原子数分数为 2%,对其采取 *c* 向切割,制成尺寸为 1.5 mm  $\times$  6 mm  $\times$  20 mm 的板条形状,如图 2 所示。前端种子源激光器中采用的抽运源为商用尾纤输出的半导体激光器,其发射光谱中心波长为 796 nm,尾纤纤芯直径为 400  $\mu\text{m}$ ,数值孔径 0.22。用焦距为 11 mm 的非球面透镜将尾纤输出的发散光进行准直,再采用焦距为 44 mm 的球面透镜聚焦,测得聚焦光斑为直径约 500  $\mu\text{m}$  的圆斑。实验中使用的非球面透镜和球面透镜都镀有在波长 796 nm 处的增透膜。晶体的 1.5 mm  $\times$  6 mm 面作为激光窗口,并且前后两个端面都镀有在波长 1910 nm 附近的高透膜,20 mm 为通过方向长度,并在 4 个侧面包钢箔置于传导冷却的纯铜微通道热沉上,热沉通水冷却。输入镜采用的是平面镜,对 796 nm 高透,对 1910 nm 高反。YLF 晶体的折射率随温度升高而降低,导致在激光器中形成负热透镜效应,为了补偿这种热透镜效应,腔镜设计采用了平凹结构,输入腔镜为平面镜,输出腔镜为凹面镜<sup>[7, 16, 17]</sup>。为了得到曲率半径和输出镜透射率的最优值,实验中对一些不同曲率和透射率的输出镜,通过功率曲线能找到最佳的选择。声光 Q 开关材料为无水熔融石英,镀激光增透膜后对 1910 nm 的透射率大于 99%,通光口径 4 mm,调制损耗为 55%。由于输出镜未镀对抽运

光的高反膜,在激光输出后放置一片窄带滤波片用以滤掉未被晶体吸收的抽运光。

后端为光纤放大系统,采用的增益光纤为双包层掺  $\text{Tm}^{3+}$  石英光纤,光纤纤芯直径为  $50\ \mu\text{m}$ ,数值孔径为 0.08,内包层直径为  $400\ \mu\text{m}$ ,数值孔径为 0.46。激光器输出的  $1910\ \text{nm}$  激光经过一个焦距

为  $11\ \text{mm}$  的非球面透镜耦合进光纤纤芯,光纤后端使用空间耦合的方式将抽运光耦合进内包层。后端抽运也是采用带尾纤的半导体激光器,激光波长同样为  $796\ \text{nm}$ ,尾纤纤芯直径为  $200\ \mu\text{m}$ ,数值孔径 0.22。耦合系统为两个对称的焦距为  $11\ \text{mm}$  的非球面透镜。

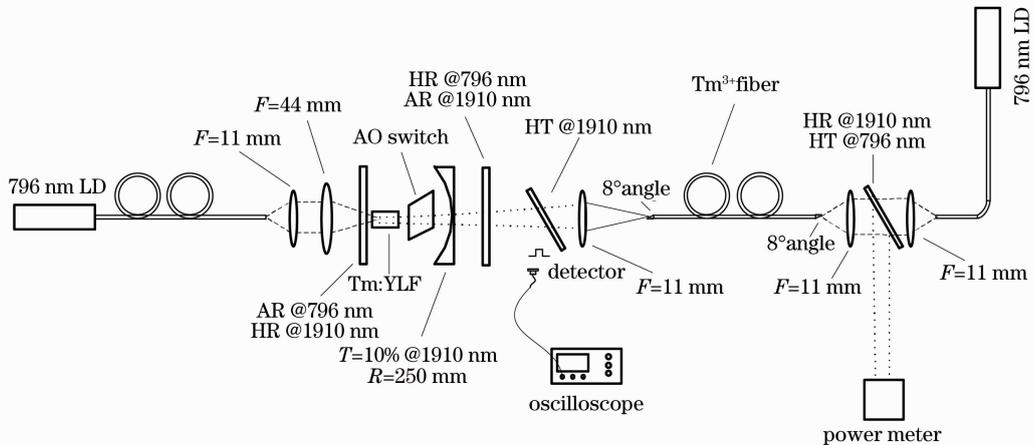


图 2 实验光路图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

## 4 实验结果及分析

根据图 2 的光路设计,为了能同时放置激光晶体和声光开关元件,腔长设定为  $90\ \text{mm}$ 。首先采用激光器连续运转的方式,在声光开关不工作的情况下,选用了 3 种输出镜分别测得激光的输出功率。正如 3 节提到 YLF 晶体存在折射率随温度升高而降低的效应,在激光运行中,这种热透镜效应可以理解为把晶体等效为一个负透镜。为了补偿负透镜在光路中引起的激光光束发散而增大腔内损耗,在输出端使用凹面形式的输出镜。实验中使用的 3 种输出镜有着不同的激光透射率和曲率半径,分别为:透射率 5%,曲率半径  $300\ \text{mm}$ ;透射率 10%,曲率半径  $250\ \text{mm}$ ;透射率 20%,曲率半径  $400\ \text{mm}$ 。

在连续运行时,根据 3 种输出镜得到激光器的输出功率曲线,如图 3 所示。由于热透镜效应的影响,当抽运功率增加到一定值时,激光输出功率出现饱和现象。通过计算可以得知在 3 种情况下的激光器斜率效率  $\eta$  分别为 18.2%, 25.6% 及 24.3%,可以看出在输出镜透射率选为 10%,曲率半径为  $250\ \text{mm}$  时,激光器工作时的效率相对较高。为了获得较高的平均输出功率,在声光调 Q 实验中使用了该透射率的输出镜。

为了研究该晶体在脉冲工作状态下的工作性

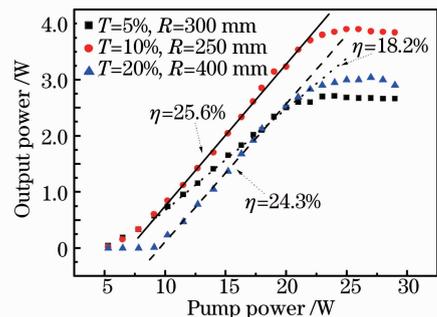


图 3 采用不同输出镜时得到的激光输出功率随抽运功率的变化曲线

Fig. 3 Curves of laser output power versus pump power with different output couple mirrors

能,测试了激光器在不同重复频率下,输出脉冲宽度随抽运功率的变化。从图 4 中可以看出,在声光开关重复频率一定的条件下,输出脉宽随抽运功率增加而减小。在抽运功率一定的情况下,输出脉宽随重复频率的增加而增加,与脉冲激光器的速率方程理论的模拟结果符合<sup>[18, 19]</sup>。值得指出的是,图中在  $2\ \text{kHz}$  条件下的曲线在抽运功率大于  $10\ \text{W}$  时出现了一个拐点。主要原因是在低重复频率工作条件下,在高抽运功率时有较严重的热效应,由此引起的激光束与抽运光的模式不匹配,实际上减小了激光增益,此时继续增加抽运功率并不能使脉冲宽度进

一步压缩,反而出现增加的趋势。当进一步增加抽运功率时,激光束与抽运光的模式重新匹配,脉冲宽度会继续减少。

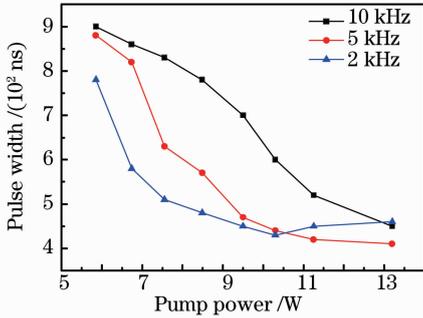


图 4 不同重复频率下脉冲宽度随抽运功率的变化

Fig. 4 Pulse width versus pump power under different frequency conditions

当激光器重复频率较低时,脉冲激光峰值功率较高,另外 2 μm 激光处于强烈的水吸收峰,在没有密封的实验室环境下,为了避免晶体端面镀的增透膜被激光损坏,在抽运功率为 12 W 的条件下,将重复频率降到 500 Hz 时,测到单脉冲宽度约为 70 ns,如图 5(a)所示,优于文献[8]报道的实验结果。继续增大抽运功率,测得激光脉冲宽度小于 60 ns,但极易引起晶体端面损坏。图 5(b)给出了脉冲序列图,脉冲峰值功率的波动小于 5%,

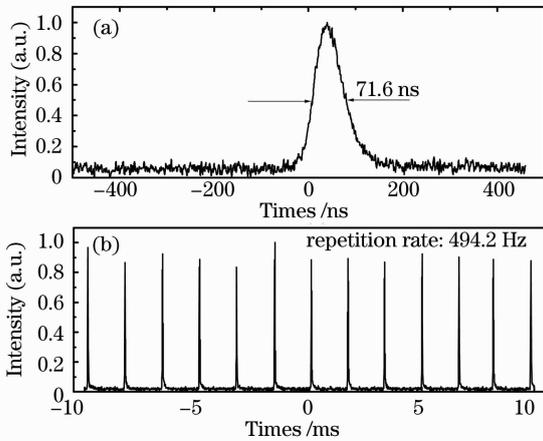


图 5 输出功率 1 W 时,重复频率约 500 Hz 情况下的单脉冲(a)和脉冲序列(b)

Fig. 5 Single pulse (a) and pulse sequence (b) with output power of 1 W and frequency of 500 Hz

为了得到更高峰值功率和单脉冲能量的激光,将 Tm:YLF 激光器输出的种子光注入到 Tm<sup>3+</sup> 石英光纤放大器中,组成如图 2 所示的 MOPA 系统。国际上已经报道的 2 μm 激光 MOPA 系统<sup>[20, 21]</sup>都采用微焦耳级种子注入经多级放大的方式,结构较

复杂,不利于系统的扩展和功率提高。在放大实验中,设定注入种子光的脉冲能量为 2 mJ,脉冲宽度为 70 ns,重复频率为 500 Hz,只需一级放大即可获得数十瓦的平均功率。

为了使抽运光有效地吸收以提高利用率,实验中使用了较长的双包层光纤(长度为 5 m),双包层光纤对 976 nm 抽运光的吸收系数为 2.7 dB/m。然而采用较长的光纤会带来较为严重的放大自发辐射(ASE),为了消除在强抽运情况下出现的 ASE 而影响放大效率和输出线宽,在光纤两个端面都采取了通过精细研磨的方式将平面磨成 8° 角的斜面。完成的 8° 角的斜面的反馈系数小于 -40 dB,有效地抑制了 ASE 的影响。通过单非球面透镜将 1910 nm 信号光耦合进光纤纤芯,由于该透镜材料(ZK3 低熔点玻璃)对 2 μm 激光有吸收,到达光纤端面的种子光约为 70%,大于 92% 的种子光被耦合进光纤纤芯中,只有低于 5% 的种子光进入内包层,总的耦合效率约为 64%。

后向抽运的 LD 抽运源最高输出功率可达到 100 W,在两个非球面透镜之间放置一块镀有对 796 nm 高透,对 1910 nm 高反的 45° 镜片,将放大输出的信号光反射进功率计。最终在重复频率为 500 Hz 时,测得单脉冲能量为 63 mJ,脉冲峰值功率为 630 kW,如图 6 所示。光纤放大器的放大系数约为 50 倍,且没有观测到明显的谱线展宽和脉冲变形现象。

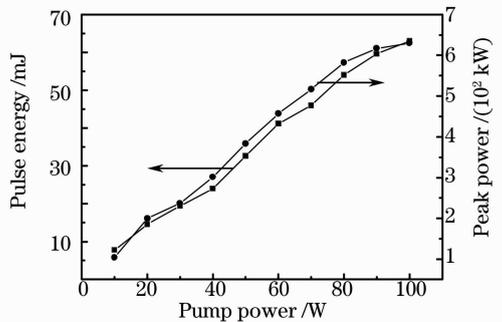


图 6 MOPA 系统的输入输出曲线

Fig. 6 Input and output curves of MOPA system

### 5 结 论

采用国内生长的掺 Tm:YLF 晶体实现了在波长 1910 nm 处的连续和脉冲激光输出。晶体尺寸为 1.5 mm×6 mm×20 mm,掺杂原子数分数为 2%,在腔长为 90 mm 条件下,采用不同透射率和曲率半径的输出镜,测得在透射率为 10%,曲率半径为

250 mm时输出激光的斜率效率最高,为 25.6%。并采用 MOPA 系统,实现了脉冲激光放大。放大最终得到 500 Hz 重复频率,峰值功率为 630 kW,单脉冲能量为 63 mJ 的高功率脉冲输出。实验结果受限于抽运源的输出功率,如果能够继续增加抽运功率,经光纤放大得到的功率及能量有望进一步提高。

### 参 考 文 献

- 1 P. A. Budni, L. A. Pomeranz, M. L. Lemons *et al.*. Efficient mid-infrared laser using 1.9- $\mu\text{m}$ -pumped Ho:YAG and ZnGeP<sub>2</sub> optical parametric oscillators [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2000, **17**(5): 723~728
- 2 G. J. Koch, J. Y. Beyon, B. W. Barnes *et al.*. High-energy 2  $\mu\text{m}$  Doppler lidar for wind measurements [J]. *Opt. Eng.*, 2007, **46**(11): 116201~116214
- 3 P. J. M. Suni, S. W. Henderson. 1-mJ/pulse Tm:YAG laser pumped by a 3-W diode laser [J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(11): 817~819
- 4 M. Chun, J. Bischoff. Thermal transient effects in optically pumped repetitively pulsed lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1971, **QE-7**(5): 200~202
- 5 G. J. Koch, J. P. Deyst, M. E. Storm. Single-frequency lasing of monolithic Ho, Tm:YLF [J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(15): 1235~1237
- 6 O. A. Louchev, Y. Urata, S. Wada. Numerical simulation and optimization of Q-switched 2  $\mu\text{m}$  Tm, Ho:YLF laser [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(7): 3940~3947
- 7 M. Schellhorn, S. Ngcobo, C. Bollig *et al.*. High-power diode-pumped Tm:YLF slab laser[C]. Lasers and Electro-Optics 2009 and the European Quantum Electronics Conference, Munich, 2009, 1
- 8 Ł. Gorajek, J. Jabczyński, W. Żendzian *et al.*. High repetition rate, tunable, Q-switched diode pumped Tm:YLF laser [J]. *Opto-Electronics Review*, 2009, **17**(4): 309~317
- 9 X. Duan, B. Yao, Y. Zhang *et al.*. Diode-pumped high-efficiency Tm:YLF laser at room temperature [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(8): 591~593
- 10 Y. Li, B. Yao, Z. Wang *et al.*. Tunable CW Tm, Ho:YLF laser at 2 microns [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(8): 470~471
- 11 Y. Wang, X. Zhang, B. Yao *et al.*. Performance of a liquid-nitrogen-cooled CW Tm, Ho:YLF laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(5): 281~282
- 12 B. Q. Yao, L. Ke, X. M. Duan, *et al.*. Stable wavelength, narrow linewidth diode-pumped Tm:YLF laser with double etalons [J]. *Laser Phys. Lett.*, 2009, **6**(8): 563~566
- 13 Shao Huaizong, Zhang Zhenya. Study on growth of laser crystal Nd:YLF[J]. *Laser&Infrared*, 1994, **24**(6): 38~41  
邵怀宗, 张振亚. Nd:YLF 激光晶体生长研究[J]. *激光与红外*, 1994, **24**(6): 38~41
- 14 Li Xinhua, Xu Jiayue, Chen Hongbing *et al.*. Growth and properties of tunable laser fluoride crystals[J]. *Laser&Infrared*, 2004, **34**(4): 247~250  
李新华, 徐家跃, 陈红兵 等. 固体可调谐氟化物激光晶体的生长与性能[J]. *激光与红外*, 2004, **34**(4): 247~250
- 15 J. F. Pinto, L. Esterowitz, G. H. Rosenblatt. Tm<sup>3+</sup>:YLF laser continuously tunable between 2.20 and 2.46  $\mu\text{m}$  [J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(12): 883~885
- 16 E. C. Honea, R. J. Beach, S. B. Sutton *et al.*. 115-W Tm:YAG diode-pumped solid-state laser [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1997, **33**(9): 1592~1600
- 17 D. Alex, W. Kevin, F. M. Peter, A CW side-pumped Tm:YLF laser[C]. *Advanced Solid-State Lasers*, Québec, 2002, WA1
- 18 Y. Wang, C.-Q. Xu. Actively Q-switched fiber lasers: Switching dynamics and nonlinear processes [J]. *Progress in Quantum Electron.*, 2007, **31**(3-5): 131~216
- 19 M. Cohen, R. Daly, and R. Kaplan. Resonant acoustooptic Q-switching of high-gain lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1971, **QE-7**(6): 316~317
- 20 P. Lee, K. Ji Won, Z. Zhaowei *et al.*. High-power single-frequency thulium-doped fiber master-oscillator power-amplifier at 1943 nm [C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics/International Quantum Electronics Conference*, Baltimore, 2009, CThN1
- 21 E. Thomas, V. Khitrov, G. Frith *et al.*. High efficiency 20 W single frequency PM fiber amplifier at 2037 nm [C]. *Advanced Solid-State Photonics*, Denver, 2009, WB2