

文章编号: 0258-7025(2009)07-1727-05

# 可调谐掺铥光纤激光器 共振抽运的 Ho:YLF 固体激光器

王 飞<sup>1, 2</sup> 沈德元<sup>2</sup> 范滇元<sup>2</sup> 陆启生<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 国防科学技术大学光电学院定向能技术研究所, 湖南 长沙 410073)  
(<sup>2</sup> 复旦大学信息学院光科学与工程系, 上海 200433)

**摘要** 用包层抽运的宽带可调谐掺 Tm 光纤激光作为抽运源研究了 Ho:YLF 2  $\mu\text{m}$  固体激光输出特性。利用光纤激光共振抽运固体激光增益介质的光纤-体块混合激光器技术可使得大部分热量产生于光纤中, 体块激光介质中只有很少的量子亏损热, 有效地降低了热产生, 有利于实现高功率、高效率的 2  $\mu\text{m}$  激光输出。研究了不同抽运波长下 Ho:YLF 激光的输出特性, 并与激光晶体的吸收光谱进行对比, 对最佳抽运波长与晶体吸收峰不一致的现象进行了分析。在最佳抽运波长下, 当抽运功率为 9.4 W 时, 得到 5.3 W 近衍射极限的 TEM<sub>00</sub> 模线偏振光输出, 激光中心波长 2066 nm, 光束质量因子  $M^2$  约为 1.1, 斜率效率达到 70 %。

**关键词** 激光器; 光纤-体块混合固体激光器; 双包层掺 Tm 光纤激光器; 可调谐; Ho:YLF 晶体

**中图分类号** TN 248.1

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL20093607.1727

## Efficient Ho:YLF Laser Pumped by Tunable Tm-Doped Fiber Laser

Wang Fei<sup>1, 2</sup> Shen Deyuan<sup>2</sup> Fan Dianyuan<sup>2</sup> Lu Qisheng<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Directed Energy Technology, College of Opto-Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China*  
<sup>2</sup>*Advanced Photonic Materials and Devices Laboratory, Department of Optical Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China*

**Abstract** The output characteristic of a novel hybrid fiber-bulk laser, demonstrated with a cladding-pumped tunable Tm-doped silica fiber laser as the pump source and Ho:YLF as the laser crystal, is researched. Most of the heat generated via quantum defect heating in this fiber-bulk laser scheme is deposited in the fiber, and thermal effects in the bulk laser are dramatically reduced leading to the prospect of much improved efficiency, beam quality and higher output power in the 2  $\mu\text{m}$  wavelength regime. Output characteristics under different pumping wavelength were experimentally studied, and it was found that the best pumping wavelength was a few nanometers off the absorption peak. Using a simple two-mirror resonator configuration, a 5.3 W polarized output is obtained at 2066 nm in a diffraction-limited TEM<sub>00</sub> beam (with  $M^2$  of about 1.1) for 9.4 W incident pump power, corresponding to a slope efficiency of 70 %.

**Key words** lasers; hybrid fiber-bulk laser; cladding-pumped Tm-doped fiber laser; tunable; Ho:YLF crystal

## 1 引 言

人眼安全的 2  $\mu\text{m}$  波段固体激光在遥感探测、激光测距、相干多普勒雷达、医学和利用非线性晶体实现波长转换产生中红外激光等方面都有重要的应用前景。Ho<sup>3+</sup> 是一种重要的 2  $\mu\text{m}$  固体激光的激活

离子。由于二极管激光器不能直接抽运单掺 Ho 的激光器, 在 Ho 激光晶体中掺入敏化离子 Tm<sup>3+</sup> 很好地解决了这一问题。自 1965 年 Johnson 等<sup>[1]</sup> 首次报道掺杂敏化离子的 Ho 激光器以来, 人们对于 2  $\mu\text{m}$  Tm, Ho 共掺激光器进行了许多研究工

收稿日期: 2008-11-27; 收到修改稿日期: 2009-03-19

作者简介: 王 飞(1981—), 女, 博士研究生, 主要从事光纤激光器方面的研究。E-mail: hiruoyi@126.com

导师简介: 沈德元(1962—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事激光技术、非线性光学方面的研究。

E-mail: shendy@fudan.edu.cn(通信联系人)

作<sup>[2~7]</sup>。但由于  $Tm, Ho$  之间的能量转移, 上转换效率较高, 导致激光效率降低, 同时增加了激光晶体的热积累。把  $Tm, Ho$  分别单独掺入不同的晶体中可以解决上述问题。用  $Tm$  固体激光( $Tm: YAG, Tm: YLF$  等)共振抽运  $Ho$  固体激光( $Ho: YAG, Ho: YLF$  等)<sup>[8,9]</sup>, 在  $Ho$  晶体中只产生很少的量子亏损热(约 10%), 减少了激光晶体的热积累, 更易于产生高功率、高效率的激光输出。然而, 对于作为抽运源的掺  $Tm$  固体激光器, 仍然存在高的量子亏损和能量上转换导致热积累较高的问题, 是获得高功率、高光束质量激光输出的主要障碍。光纤较之传统的体块增益介质具有非常大的表面积-体积比, 散热容易。且光纤激光器的输出模式由光纤参数设计和选模技术决定, 在很高的功率水平下也可以获得非常好的光束质量。此外, 光纤激光器在系统的小型化、稳定、可靠性和免于维护等方面都有独特的优势。掺  $Tm$  光纤激光器的输出波长有非常宽的调谐范围( $>300$  nm), 可通过调谐使之与各种掺  $Ho$  的激光增益晶体的吸收峰相匹配。另外, 掺杂浓度优化后, 掺  $Tm$  光纤中相邻  $Tm$  离子之间的交叉弛豫过程使得 793 nm 半导体激光器抽运时  $Tm$  光纤激光器的量子效率可接近 2<sup>[10]</sup>, 大大提高了光纤激光器的输出效率。以上优点使得这种宽调谐、高效、高光束质量的掺  $Tm$  光纤激光器成为掺  $Ho$  固体激光器的理想抽运源。

掺  $Tm$  光纤激光共振抽运高效  $Ho: YAG$ <sup>[11,12]</sup> 和  $Ho: YLF$ <sup>[13~15]</sup> 固体激光目前均已见报道, 前者激光输出斜率效率达 80%<sup>[12]</sup>, 后者最高为 65%<sup>[13]</sup>。最近 Dergachev 等<sup>[16]</sup> 用约 105 W  $Tm$  光纤激光抽运  $Ho: YLF$  晶体, 产生了 43 W 的最大连续波输出, 斜效率为 42%。在所报道的  $Tm$  光纤抽运  $Ho: YLF$  混合激光器中, 其抽运源皆为固定波长(1940/1941 nm)商用(例如 IPG)  $Tm$  光纤激光器。本文报道用自建的宽调谐掺  $Tm$  光纤激光器作为抽运源, 研究了不同抽运波长下  $Ho: YLF$  激光的输出特性, 并对实验结果进行了分析。在最佳抽运波长条件下, 当光纤激光抽运功率为 9.4 W 时, 在 2066 nm 波长处获得 5.3 W 的激光输出, 光束质量因子  $M^2$  约 1.1, 斜率效率高达 70%。

## 2 实验设计及结果分析

### 2.1 实验装置及激光工作物质

2  $\mu m$  固体激光器的基质材料很多, 目前常用的有  $YAG, YLF, YAP, YVO_4, GdVO_4$  等晶体, 其中应

用最多的为  $YAG$  和  $YLF$ 。氟化物基质晶体( $YLF$ )分子式为  $LiYF_4$ , 属于四方晶系。这种晶体的特点是在紫外光谱区吸收损耗小, 非线性折射系数小, 非常适合于三价稀土金属离子(例如  $Tm^{3+}, Ho^{3+}$ )的掺杂。与  $YAG$  相比,  $YLF$  具有良好的抗光学损伤能力、热稳定性、贮能性能以及输出激光是线偏振等优点, 在同样的抽运条件下  $YLF$  的热透镜效应只有  $YAG$  的 1/10, 是产生 2  $\mu m$  激光的重要晶体。

实验装置如图 1 所示。 $Ho: YLF$  的抽运源为可调谐掺  $Tm$  双包层光纤激光器。所用光纤长约 4.7 m, 纤芯直径和数值孔径分别为 20  $\mu m$  和 0.12, 内包层直径和数值孔径分别为 200  $\mu m$  和 0.49。由波长 790  $\mu m$  的光束整形的激光二极管阵列对其进行双端面抽运。 $M_1$  和  $M_2$  为 45 度二向色镜, 对 790 nm 抽运光高反, 对 2  $\mu m$  激光高透。这样的谐振腔设计允许使用不同的透镜进行输出光束准直和抽运光的聚焦, 达到分别优化。腔外的衍射光栅(600 lines/mm)提供波长选择反馈,  $Tm$  光纤靠近光栅的端面抛斜角, 防止光纤端面的宽带菲涅耳反射与光栅反射的窄带光在介质内造成模式竞争。激光二极管耦合抽运功率达到 43 W 时, 光纤激光在 1945 nm 波长处产生  $>10$  W 的功率输出。通过调节光栅, 光纤激光器输出波长可以在 1855~2070 nm 范围内调谐( $>215$  nm), 同时保持输出功率瓦级以上水平, 当输出波长位于 1860~2010 nm 范围内时, 光纤激光器输出功率超过 9 W, 半峰全宽(FWHM)小于 0.5 nm。

增益介质为 15 mm ( $\phi 5$  mm)长  $a$ -轴切割的  $Ho: YLF$  棒状晶体,  $Ho$  离子原子数分数为 1.5%。棒的两端面镀了增透膜, 对 1.9~2.1  $\mu m$  的激光透过率  $>99.8\%$ 。激光棒置于水冷的铜热沉中, 温度保持在 15  $^{\circ}C$ 。激光谐振腔采用简单的两镜腔设计。输入耦合镜为平面镜, 在抽运波长处高透( $T >99\%$ ), 激光波长处高反( $R >99.8\%$ )。输出耦合镜为凹面镜, 曲率半径 25 mm, 对 2066 nm 的激光透过率约为 3%。棒的左端面距离平面耦合镜约 1 mm, 整个谐振腔的光学长度为 18 mm, 计算得到  $Ho: YLF$  晶体中  $TEM_{00}$  模腰斑半径约为 95  $\mu m$ , 而抽运光在激光晶体中的腰斑半径和共焦参数分别为 105  $\mu m$  和 18 mm。处于基态的粒子吸收抽运光跃迁到高能态后才能获得激光增益, 由抽运光在  $Ho: YLF$  中的强度分布而产生的增益分布起到了软边光阑的作用。该软边光阑有效地抑制了谐振腔中传输的高阶模, 易于使激光器处于基横模运转状态。

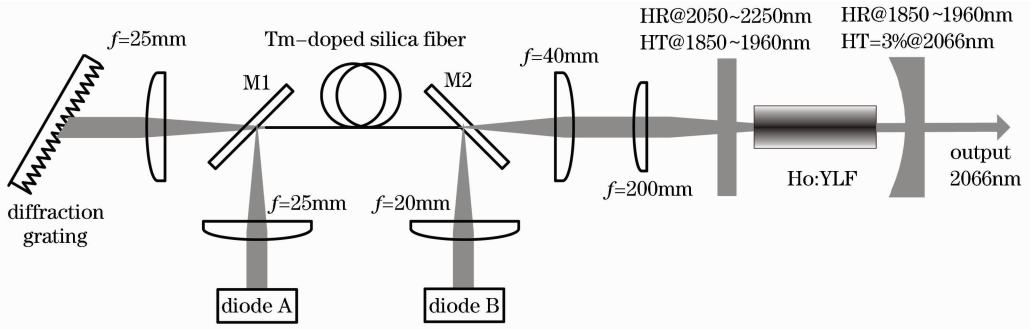


图 1 掺 Tm 光纤激光器抽运 Ho:YLF 的实验装置图

Fig.1 Schematic of Ho:YLF laser pumped by Tm-doped silica fiber laser

### 2.2 实验结果与分析

由于谐振腔输出耦合镜对抽运光 1945 nm 高反,抽运光前向传输经过激光晶体后,被凹面镜汇聚反射后再次经过晶体,抽运光两次通过 Ho:YLF 被吸收的结果是提高了抽运吸收率和激光器输出效率。实验测量了无激光辐射情况下该 Ho:YLF 晶体对单次通过抽运光的吸收率,如图 2 所示。当抽运光处于低功率水平时,单程吸收率约为 80%,抽运功率增大至 9.4 W 时,由于基态漂白效应,吸收率下降到 51%。在有激光辐射的情况下,抽运光单次通过晶体的吸收率接近小信号情况约 80%,两次通过晶体总的吸收率接近 96%。

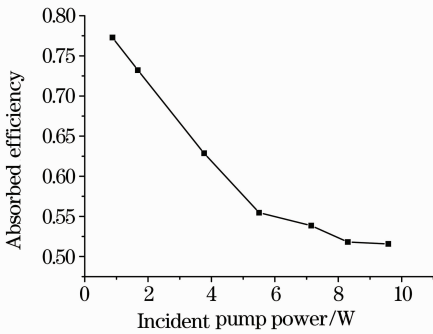


图 2 Ho:YLF 吸收效率随抽运功率升高的变化曲线

Fig.2 Absorbed efficiency of Ho:YLF versus incident pump power

掺 Tm 光纤激光器输出为随机偏振光,用该激光抽运 Ho:YLF 晶体,保持 Tm 光纤激光器的输出功率一定,测量 Ho 激光在不同抽运波长下(1875~1968 nm)的输出功率,如图 3 实线所示。由实验曲线容易看出,当光纤激光器抽运波长为 1945 nm 时,Ho 激光的输出功率最大。但是这个波长与 Ho:YLF 吸收光谱(图 3 中的虚线)显示的吸收峰位置明显不一致,从吸收光谱上看, Ho:YLF 的

吸收峰值波长为 1939 nm。也就是说,从实验得到这样一个结论:吸收光谱的峰值波长并不一定是最佳抽运波长。从抽运光在激光晶体中分布的均匀性及其对激光输出的影响考虑,对这一问题进行以下定性解释:由于激光晶体具有一定的长度,抽运光从一端输入,输入端吸收的抽运光功率较输出端大,必然导致晶体中的光功率和增益分布不均匀。在同样的抽运功率下,晶体对抽运光的吸收系数越大,这种功率和增益分布的不均匀性就越严重,到了一定程度就会对输出功率的提高造成不利影响。而对于实验中抽运波长稍微偏离吸收峰的情况,虽然单程吸收效率有所降低,但前向传输的抽运光被凹面镜汇聚反射后再次经过晶体,总的吸收效率并不会减少,而且激光晶体中的光功率分布更加均匀,这对提高输出功率是有利的。

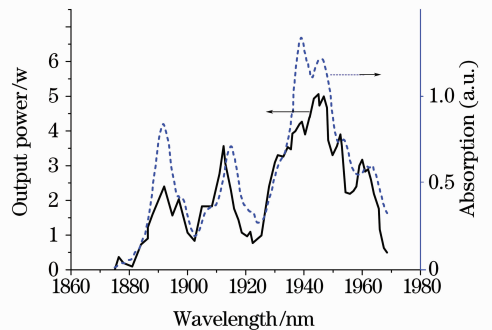


图 3 Ho:YLF 激光在不同抽运波长下的输出功率与 Ho:YLF 晶体的吸收光谱图

Fig.3 Output power of Ho:YLF laser under different pumping wavelength and absorption cross-section for Ho:YLF crystal

Ho:YLF 激光器以准三能级方式运转,激光晶体的温度对各能级粒子数分布影响很大,进而也就影响到激光器的输出特性。固定入射抽运功率为

8 W的情况下,实验测量了激光功率随晶体温度的变化,当晶体温度从6 °C升到40 °C时,输出功率从4.58 W降到2.02 W。

保持铜热沉温度为15 °,在上述最佳抽运波长条件下进行实验,测得Ho:YLF激光阈值功率为0.75 W,当抽运光功率达到最大值9.4 W时,激光器在2066 nm处产生5.3 W近衍射极限的TEM<sub>00</sub>模激光输出,光束质量因子 $M^2$ 约1.1。由于Ho:YLF晶体的自然双折射特性,输出激光为线偏振光。激光功率随入射抽运光功率变化的曲线如图4所示。抽运功率较低时,斜率效率随入射抽运光功率的增加有所提高,当抽运光功率超过4~5倍阈值水平时,基态对激光的重吸收损耗逐渐达到了饱和,斜率效率也达到稳定值,约为70%。从图4可以看出,激光功率随入射抽运功率的增加呈线性增长关系,在达到最大抽运功率时,曲线也未显示出任何饱和的趋势。也就是说,这种情况下,激光输出功率的提高仅仅受限于抽运功率水平,因此,通过简单的提高掺铱光纤激光器的输出功率,Ho:YLF的输出功率就有进一步的提升空间。图4内的小图显示了输出功率为3.2 W时的激光光谱,激光的中心波长约2066 nm。

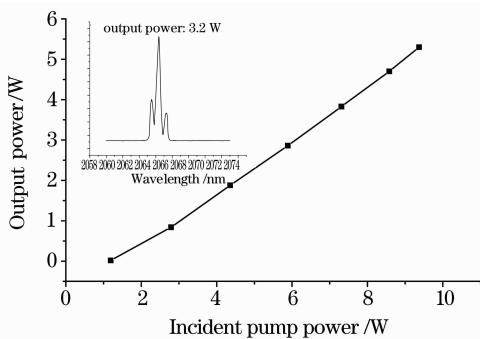


图4 激光输出功率随入射抽运光功率的变化曲线(小图: Ho:YLF 输出光谱)

Fig. 4 Output power versus incident pump power.

Inset: Frequency spectra of Ho:YLF laser

实验获得70%高效率的激光输出,除了选择了最佳抽运波长和谐振腔优化外,主要还是因为采用了共振抽运的方式。传统LD抽运Ho激光的方式量子亏损非常大,大部分抽运功率在激光介质中转化成废热,不但对激光斜率效率来说是一种浪费,更增加了激光晶体的热积累,导致热透镜效应严重,输出光束质量变差。用1945 nm的Tm光纤激光抽运2066 nm的Ho激光,量子亏损仅为6%左右,有效地降低了热产生,易于实现高效率的Ho激光输

出。而对于LD抽运的光纤激光器本身,虽然表面上看好像仍存在严重的量子亏损,但事实上,由于使用793 nm的半导体激光器抽运时光纤中相邻Tm离子之间存在交叉弛豫过程,对掺Tm光纤进行掺杂浓度优化后,量子效率接近200%,另外,光纤具有大的表面积-体积比,散热容易,可以实现高效率的激光输出。同时共振抽运的光纤-体块混合激光器在获得高能量脉冲光输出方面也独具优势,对于单独使用光纤作为增益介质的激光器,由于受光纤几何形状限制,脉冲能量难以提高;而传统的体块介质激光器热积累较大,散热困难,输出光束质量差,效率低。混合激光器克服了两者的缺点,用光纤激光器输出的高亮度抽运光共振抽运Ho固体激光,允许使用Ho<sup>3+</sup>低掺杂的晶体,降低了上转换损失,提高了荧光寿命,Ho:YLF晶体高的激光上能级寿命和大的光存储容量,更有利于Q开关运转。该混合级激光器综合了光纤散热容易和体块介质光存储容量大的优点,有望实现高效率、高光束质量、高平均功率、高脉冲能量的激光输出。

### 3 结 论

报道了利用自建的宽调谐掺Tm光纤激光器抽运的Ho:YLF固体激光器,研究了不同抽运波长下Ho:YLF激光的输出特性,实验发现最佳抽运波长有时并不一定对应晶体的最大吸收峰,对这一实验现象进行了分析。在最佳抽运波长条件下,当光纤激光抽运功率为9.4 W时,在2066 nm波长处获得5.3 W的激光输出,光束质量因子 $M^2$ 约1.1,斜率效率高达70%。

### 参 考 文 献

- 1 L. F. Johnson, J. E. Geusic, L. G. Vanuitert, Coherent oscillation from Tm<sup>3+</sup>, Ho<sup>3+</sup>, Yb<sup>3+</sup> and Er<sup>3+</sup> ions in yttrium aluminum garnet. [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1965, **7**: 127~129
- 2 Wu Chunting, Ju Youlun, Wang Zhenguo *et al.*. Laser diode-pumped Tm, Ho: YLF single-frequency laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(6): 815~818.  
吴春婷,鞠有伦,王振国等. 激光二极管抽运的Tm, Ho: YLF单模激光器[J]. *中国激光*, 2008, **35**(6): 815~818
- 3 Yao Baoquan, Wang Qi, Wang Yuezhu *et al.*. Experimental study of (Tm, Ho): YLF microchip laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(10): 1216~1218  
姚宝权,王 骐,王月珠等. (Tm, Ho): YLF微片激光器的实验研究[J]. *光学学报*, 2002, **22**(10): 1216~1218
- 4 Yao Baoquan, Ju Youlun, He Wanjun *et al.*. Experimental analysis of spectral properties of (Tm, Ho): YLF laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(7): 935~938  
姚宝权,鞠有伦,贺万骏等. 激光二极管抽运(Tm, Ho): YLF激光器光谱特性实验分析[J]. *光学学报*, 2005, **25**(7): 935~938
- 5 Wang Zhenguo, Zhang Yunjun, Shao Xiaowei *et al.*. Short-term

- frequency stability measurement of 2  $\mu\text{m}$  Tm:Ho:YLF microchip laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(s1): 38~40  
 王振国,张云军,邵晓巍等 2  $\mu\text{m}$  Tm:Ho:YLF 微片激光器短期频率稳定度的检测[J]. *中国激光*, 2008, **35**(s1): 38~40
- 6 Chunting Wu, Youlun Ju, Yufeng Li *et al.*. Diode-end-pumped composite Tm:YAG rod with undoped ends at room temperature [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(8): 594~596
- 7 Chunting Wu, Youlun Ju, Yufeng Li, Zhenguo Wang, Yuezhu Wang. Diode-pumped Tm:LuAG laser at room temperature[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(6): 415~416
- 8 X. M. Duan, B. Q. Yao, C. W. Song *et al.*. Room temperature efficient continuous wave and Q-switched Ho:YAG laser double-pass pumped by a diode-pumped Tm:YLF laser [J]. *Laser Phys. Lett.*, 2008, **1-4**: 1~4
- 9 P. A. Budni, C. R. Ibach, S. D. Setzler *et al.*. 50-mJ, Q-switched, 2.09  $\mu\text{m}$  holmium laser resonantly pumped by a diode-pumped 1.9  $\mu\text{m}$  thulium laser. [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**: 1016~1018
- 10 S. D. Jackson. Cross relaxation and energy transfer upconversion process relevant to the function of 2  $\mu\text{m}$  Tm-doped silica fiber lasers. [J]. *Opt. Comm.*, 2004, **230**: 197~203
- 11 D. Y. Shen, W. A. Clarkson, L. J. Cooper *et al.*. Efficient single-axial-mode operation of a Ho:YAG ring laser pumped by a Tm-doped silica fiber laser. [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**: 2396~2398
- 12 D. Y. Shen, A. Abdolvand, L. J. Cooper *et al.*. Efficient Ho:YAG laser pumped by a cladding-pumped tunable Tm:silica-fibre laser. [J]. *Appl. Phys. B*, 2004, **79**: 559~561
- 13 Yingxin Bai, M. Petros, Jirong Yu *et al.*. Highly efficient Ho:YLF laser pumped by Tm: fiber laser. [C]. *CLEO/QELS and Phast*, 2006, CThFF 4
- 14 Ying xin Bai, Jirong Yu, M. Petros *et al.*. Highly efficient Q-switched Ho:YLF laser pumped by Tm: Fiber laser [C]. OSA Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science Conference and Photonic Applications Systems Technologies, 2007, CTuN5.
- 15 A. Dergachev, Darrell Armstrong, Arlee Smith *et al.*. 3.4  $\mu\text{m}$  ZGP RISTRA nanosecond optical parametric oscillator pumped by 2.05  $\mu\text{m}$  Ho:YLF MOPA system. [J]. *Optics Express*, 2007, **15**(22): 14404~14413
- 16 A. Dergachev, P. F. Moulton, T. E. Drake. High-power, high-energy Ho:YLF laser pumped with Tm: fiber laser. [C]. OSA Advanced Solid State Photonics, 2005: 608~612