

26 W 中波红外固体激光器

韩 隆 苑利钢 陈 国 侯天禹 魏 磊 何利杰 王克强

华北光电技术研究所固体激光技术重点实验室, 北京 100015

摘要 阐述了一种获得高功率3~5 μm 中红外激光输出的实验方案,即先通过高功率1.94 μm 光源抽运 Ho:YLF 晶体,获得高重复频率2.05 μm 激光输出,通过端抽运放大方式,提升2.05 μm 激光功率水平,最终2.05 μm 激光抽运光参量振荡器(OPO)实现高功率中波激光输出。在水冷工作体制下获得了重复频率5 kHz、最大功率26.9 W的中波输出,脉冲宽度为24.4 ns,2.05 μm 到3~5 μm 的光光转换效率达50%,通过角度调谐获得不同波长的中红外激光输出,验证了该实验方案作为一种获得高功率、高效率、高重复频率中红外激光输出工作方式的可行性。

关键词 激光器; 2 μm ; 光参量振荡器; 3~5 μm ; 高重复频率; Ho:YLF

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0302004

26 W Mid-Infrared Solid-State Laser

Han Long Yuan Ligang Chen Guo Hou Tianyu Wei Lei He Lijie Wang Keqiang

*Key Laboratory of Solid-State Laser Technology, North China Research Institute of Electro-Optics,
Beijing 100015, China*

Abstract A high power mid infrared (Mid-IR) laser is introduced. High frequency laser of 2.05 μm is obtained in Ho:YLF laser pumped by 1.94 μm laser, and the power of 2.05 μm laser is increased by amplifying in an end-pumping schedule, finally, a high power Mid-IR laser is obtained in a OPO pumped by the 2.05 μm laser. The schedule is cooled by water, the max power of Mid-IR laser is up to 26.9 W, the pulse width is 24.4 ns, the efficiency from 2.05 μm to Mid-IR is up to 50%, and the wavelength is varied with the different input angle. Through the experience, it is proved that a high power, high frequency and high efficiency Mid-IR laser can be realized in this method.

Key words lasers; 2 μm ; optical parametric oscillator; 3~5 μm ; high frequency; Ho:YLF

OCIS codes 140.3070; 260.3060; 190.4410

1 引 言

3~5 μm 波段激光在光谱学、遥感、医疗、环保等诸多领域都有重要的应用价值和前景,尤其在军事领域高重复频率大功率的3~5 μm 中波激光源在定向红外光电对抗系统中的重要应用^[1],使得3~5 μm 波段激光器成为激光技术研究的热点,其中,中波固体激光器在获得高功率3~5 μm 激光输出方面进展迅速。

在固体激光技术领域内,获得高功率3~5 μm 激光输出的方法有多种,一种是利用准相位匹配技术直接实现从1.06 μm 到3~5 μm 的中波输出,工作物质为周期极化铌酸锂晶体(PPLN)或掺 MgO 周期极化铌酸锂晶体(PPMgLN)^[2-3],虽然这类晶体具有较高的非线性系数和简化中红外激光器结构的潜在价值,但是在大尺寸晶体制备技术方面距离实际应用仍有相当的距离;另一种实现方式就是先获得2 μm 波段的激光输出,以此作为中波激光器的抽运光源,利用光参量振荡(OPO)技术,实现3~5 μm 激光输出^[4-5],其中,磷化锗锌(ZGP)晶体以其所具备的非线性系数高、导热性能好、透射光谱范围宽和损伤阈值高等特性,成为该类技术方案中获得高功率中波激光输出的优选非线性材料。文中研究人员采用了掺钬氟化钇锂(Ho:YLF)激光器作为光源,抽运磷锗锌光参量振荡器(ZGP OPO)获得了高功率中波激光输出。

收稿日期: 2014-10-24; 收到修改稿日期: 2014-12-03

作者简介: 韩 隆(1979—),男,硕士,高级工程师,主要从事二极管抽运激光器及中长波固体激光技术等方面的研究。

E-mail: 13693024904@163.com

2 理论研究

2.1 Ho:YLF 激光材料特性研究

可用于产生 $2\ \mu\text{m}$ 激光的晶体主要是以 YAG, YAP, YLF 为基质, 掺以 Ho, Tm, Er 激活离子的 Ho:YLF、Ho:YAP、Tm:YAP、Tm:YAG、Tm, Ho:YLF 等激光晶体^[6-9]。其中, Ho:YLF 在 $2\ \mu\text{m}$ 激光输出方面具有优良的输出特性。其基质材料 YLF 分子式为 LiYF_4 , 属于四方晶系, 材料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(如 Ho^{3+})的掺杂, 掺有 Ho^{3+} 离子的 YLF 晶体有较高的光存储容量。与 Ho:YAG 等晶体相比, Ho:YLF 激光器有较高的斜率效率和较低的阈值。此外, 由于 YLF 是一种低声子能材料, 使得 Ho:YLF 晶体同其他基质相比, 还具有热稳定性好、上变频损耗小, 抗光学损伤能力强、无热诱发的双折射、输出激光线偏振等优点。

Ho:YLF 晶体作为单轴晶体材料, 具有两个等价的 a 轴和一个 c 轴, 其中, a 轴晶体随着偏振的选择会体现出不同的吸收特性和发射特性, 一种偏振是电矢量方向平行于 c 轴的 π 偏振光, 另一种偏振是电矢量方向垂直于 c 轴的 σ 偏振光。

图 1 为 Ho:YLF 在 π 偏振和 σ 偏振方向上的吸收和发射光谱曲线, 可以看出 π 偏振上, Ho:YLF 晶体的吸收峰位于 $1940\ \text{nm}$, 该波长恰好与 Tm:YAP 激光器的发射波长相匹配, 因此, 可以采用 Tm:YAP 激光器作为 Ho:YLF 激光器的抽运源, π 偏振上, Ho:YLF 激光输出的中心波长位于 $2050\ \text{nm}$ 。

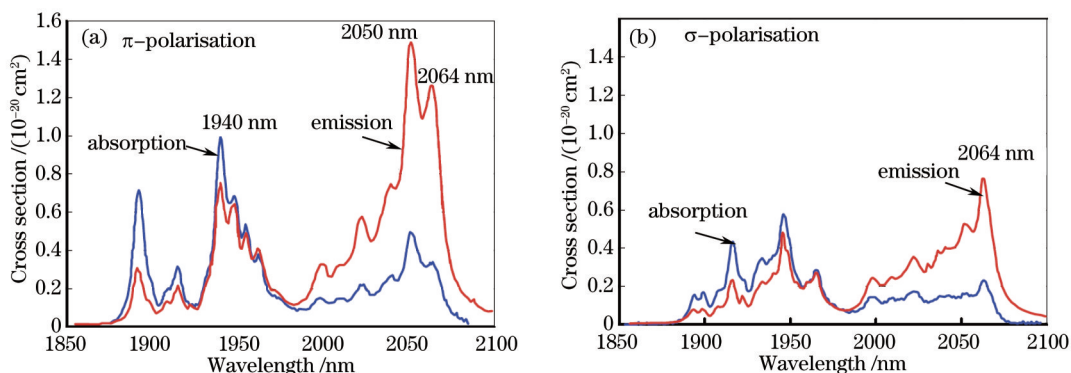


图 1 Ho:YLF 晶体偏振吸收光谱图

Fig.1 Spectrum of Ho:YLF crystal

2.2 ZGP 晶体特性研究

在可获得中波激光输出的非线性晶体中, ZGP 因其较高的非线性系数 ($75\ \text{pm/V}$)、宽的透明范围 ($0.7\sim 12\ \mu\text{m}$)、高热导性 ($0.36\ \text{W/cm}\cdot\text{K}$)、低阈值和高损伤阈值, 成为高功率中红外波段光参量振荡器的首选材料^[10-11]。

图 2 为长度 $14\ \text{mm}$ 、未镀膜 ZGP 晶体的光谱透射图, 可以看出, $2\sim 5\ \mu\text{m}$ 均处于晶体的有效透射光谱波段, 同时, 可以从图 2 中 insert1 图看出, $2\ \mu\text{m}$ 波长处于晶体有效透射光谱的边沿, 但晶体的吸收系数一般可以控制在 $0.1\ \text{db/cm}^{-1}$ 以下, 并且通过退火等特殊工艺可以达到 $0.05\ \text{db/cm}^{-1}$, 因此, 以 $2\ \mu\text{m}$ 作为抽运光, 产生

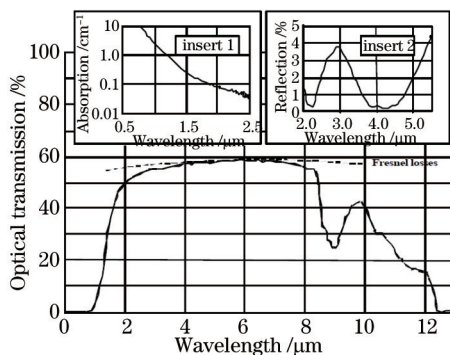


图 2 ZGP 晶体透射光谱率曲线

Fig.2 Transmission of ZGP crystal

的信频光和闲频光均位于3~5 μm波段范围内,激光器可以具备较高的转换效率,图2中的 insert2图显示了ZGP晶体的表面镀膜曲线图,通过镀膜ZGP晶体表面的对2 μm和中波波段的反射率可以控制到1%以下,满足中波光参量变换的需求。

ZGP作为一种可调谐非线性晶体,由于其折射率对温度的不敏感性,以此,主要通过角度调谐来实现特定波长的激光输出。当一束波长为λ的激光在ZGP晶体内沿与晶体主轴夹角θ的方向上传播时,相位匹配可通过计算得到。

ZGP为正单轴晶体,晶体在o光和e光方向上的折射率为

$$n_o^2 = 4.473 + \frac{5.266\lambda^2}{\lambda^2 - 0.134} + \frac{1.491\lambda^2}{\lambda^2 - 662.6}, \quad (1)$$

$$n_e^2 = 4.633 + \frac{5.342\lambda^2}{\lambda^2 - 0.143} + \frac{1.458\lambda^2}{\lambda^2 - 662.6}, \quad (2)$$

式中 n_o 为ZGP晶体内部垂直光轴方向的折射率, n_e 为ZGP晶体内沿光轴方向的折射率。

光束沿θ角度传播时的折射率为

$$\frac{1}{n_e^2(\theta)} = \frac{\cos^2\theta}{n_o^2} + \frac{\sin^2\theta}{n_e^2}, \quad (3)$$

根据晶体中三波相互作用的能量守恒:

$$\omega_p n_p = \omega_s n_s + \omega_i n_i, \quad (4)$$

式中p代表抽运光,s代表信频光,i代表闲频光

通过计算机可以计算出特定波长激光抽运下,ZGP晶体的相位匹配特性曲线。图3给出了2.05 μm激光抽运ZGP OPO时的I类相位匹配曲线。

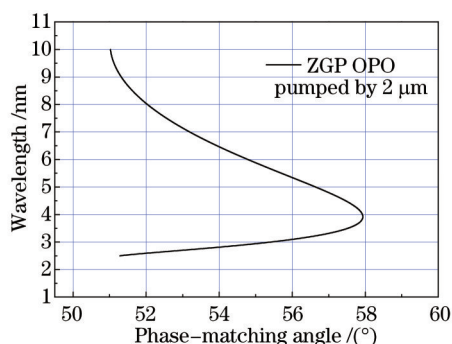


图3 2.05 μm激光源抽运OPO时ZGP的匹配曲线

Fig.3 Phase matching curve of ZGP OPO pumped 2.05 μm laser

当晶体的切割角度θ选择在55.4°~57.9°之间,可获得3~5 μm波段激光输出。

3 实验装置

实验采用Ho:YLF激光器抽运ZGP OPO的实验结构,其中Ho:YLF激光器采用本振加放大的结构,如图4所示,M1、M2、Ho:YLF和Q-S组成了Ho:YLF激光器的本振级,腔型采用平-凹稳腔结构,M1为本振级全反镜,镜片为平面镜,表面镀有1.94 μm高透膜和2.05 μm全反膜,1.94 μm抽运光经过M1镜片入射Ho:YLF晶体端面,抽运光斑约为1.5 mm,M2为本振级输出镜,曲率半径为500 mm,表面镀有2.05 μm部分透射膜,反射率R=85%,Ho:YLF晶体采用圆棒状结构,沿a轴切割,掺杂原子数分数为4%,晶体直径为5 mm,长度20 mm,两个端面镀有1.9~2.05 μm波段的高透膜,Q-S为声光Q开关器件,工作波段位于2 μm,工作频率为5 kHz;Ho:YLF激光放大级由镜片P1、镜片P2和Ho:YLF晶体组成,本振级输出的2.05 μm激光经过耦合透镜f1进入放大级Ho:YLF晶体,P1、P2镜片分别为45°1.94 μm和2.05 μm双波段耦合镜片,对2.05 μm高反,对1.94 μm高透,放大级的1.94 μm抽运光经过耦合透镜f2、P1镜片进入Ho:YLF晶体端面,抽运光斑尺寸约为1.5 mm,本振输出的2.05 μm信号光在放大级的Ho:YLF晶体中实现放大。

Ho:YLF激光器经过一级放大后获得高功率2.05 μm激光,经过聚焦透镜f3,会聚入由镜片M3、M4和

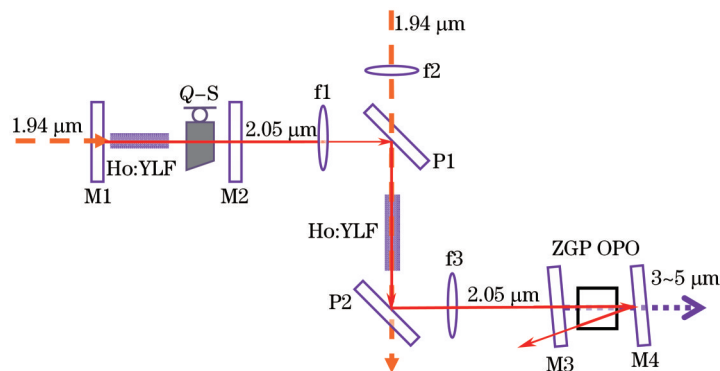


图4 Ho:YLF激光器抽运ZGP OPO结构示意图

Fig.4 Structure of ZGP OPO pumped by Ho:YLF laser

ZGP晶体组成的OPO,OPO采用平-平腔,其中,M3为OPO全反镜,表面镀有2.05 μm高透和中波高反膜,M4为OPO输出镜,为提升2.05 μm在晶体内的抽运强度,M4表面镀有2.05 μm全反和中波部分透射膜,为防止M4镜片反射的2.05 μm激光对元件造成损伤,M3和M4的法线方向与轴向略成一定角度,使2.05 μm反射光偏离原光路;ZGP晶体采用I类匹配,切割角度 $\theta=56.5^\circ$, $\varphi=0^\circ$,端面尺寸为5 mm×5 mm,双端面镀有2.05 μm和中波双波段透射膜。

4 实验结果及分析

4.1 高功率2.05 μm激光测试结果

Ho:YLF激光器本振级在高功率1940 nm激光抽运下获得18.2 W脉冲激光输出,激光重复频率为5 kHz,采用脉宽探测器测得2050 nm激光脉冲宽度为32 ns。用波长计对Ho:YLF激光波长进行测试,测试结果显示,Ho:YLF激光中心波长位于2049.55 nm,与理论分析一致。

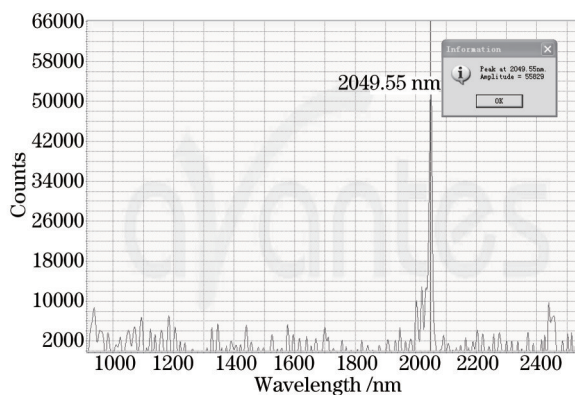


图5 Ho:YLF激光器输出光谱图

Fig.5 Output spectrum of Ho:YLF laser

以本振级的18.2 W的2050 nm激光为种子源,在经过一级端抽运放大后2050 nm激光功率提升至53.7 W。

4.2 中红外激光测试结果

图6为不同2050 nm激光抽运下,中波激光的功率输出特性曲线,当2050 nm抽运功率为9.1 W,中波激光达到输出阈值,在53.7 W抽运功率下,中波激光最高输出达到26.9 W,光光转换效率达50%,输出斜效率达54.6%,最高功率输出状态下曲线的线性度较好,因此,通过进一步提升2050 nm激光功率,中波激光有望获得更高功率输出。

在最高功率输出下,采用中红外(Mid-IR)脉宽探头对激光脉冲宽度进行测试,中波激光脉冲的半峰全宽(FWHM)值为24.4 ns,与2050 nm抽运激光的脉宽比较,中波激光脉宽出现一定的压缩,这是因为在时域上,中波激光是在2050 nm抽运光能量上升达到一定阈值后产生的,并随着抽运光能量下降到一定阈值后消失。

采用光谱分析仪,对激光的输出光谱进行了测试,由于采用双谐振腔结构,中波将有信频光和闲频光两

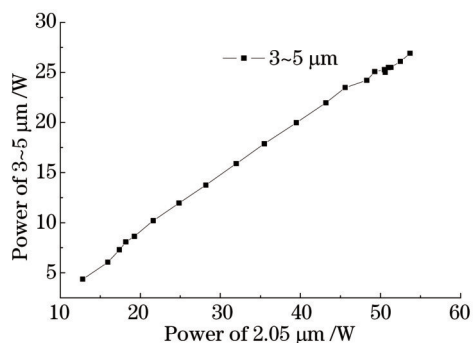


图6 中波激光功率输出曲线

Fig.6 Curve of Mid-IR laser

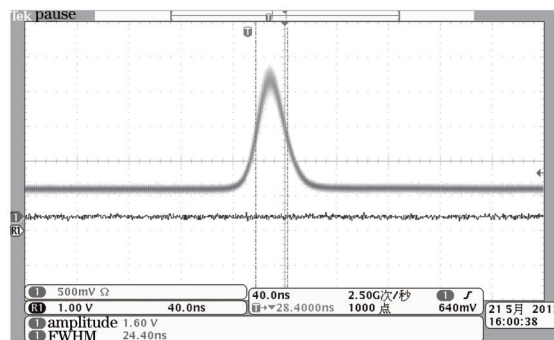


图7 中波激光输出脉宽图

Fig.7 Pulse width of Mid-IR laser

个波段同时输出,经测试,中波激光光谱峰值出现在 3520 nm 和 4900 nm 位置,此时 ZGP 角度 $\theta = 56.5^\circ$,与理论计算基本相符。

通过对 ZGP 晶体 θ 角度的调谐,中波激光的双峰值伴随角度的变化发生偏移,图 9 为增大晶体入射角约为 1° 时的中波输出光谱图,光谱峰值在 3750 nm 和 4500 nm 实现输出。

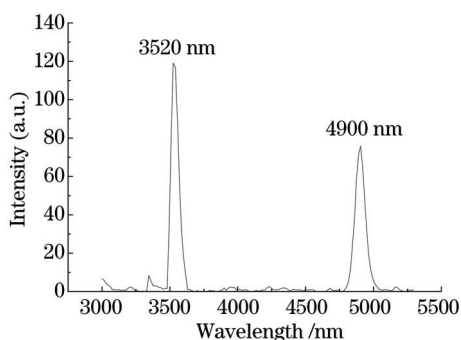


图8 中波激光输出光谱图

Fig.8 Output spectrum of Mid-IR laser

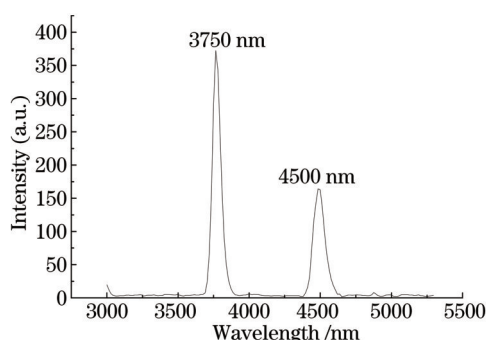


图9 中波激光调谐输出光谱图

Fig.9 Tuning output spectrum of Mid-IR laser

5 结 论

对 Ho:YLF 晶体和 ZGP 晶体特性进行了理论研究,通过实验研究,在室温条件下,通过 1940 nm 激光抽运 Ho:YLF 激光再放大的方式,获得 53.7 W 的高功率 2050 nm 高重复频率激光输出,并以此为抽运源实现了 26.9 W 的中波激光输出,测得激光波长为 3520 nm 和 4900 nm,光光转换效率达到 50%,脉冲宽度 25 ns,重复频率 5 kHz,通过对 ZGP 角度进行调谐后,获得 3750 nm 和 4500 nm 激光输出。通过实验验证了 Ho:YLF 激光器抽运 ZGP OPO 获得高功率、高效率、高重复频率中红外激光输出的方案是可行的。同时,在进一步提升 Ho:YLF 激光器输出功率的条件下,可以获得更高功率的中波激光输出。

参 考 文 献

- 1 Fan Jinxiang. Status quo and trend of infrared system and technologies for America cs ballistic missile defense system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(5): 536-550.
范晋祥. 美国弹道导弹防御系统的红外系统与技术的发展[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(5): 536-550.
- 2 Peng Yuefeng, Lu Yanhua, Xie Gang, *et al.*. Investigation of quasi-phase-matched optical parametric oscillator based on PPMgLN [J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(5): 670-674.
彭跃峰, 鲁燕华, 谢刚, 等. 准相位匹配 PPMgLN 光参量振荡技术[J]. 中国激光, 2008, 35(5): 670-674.
- 3 Peng Yuefeng, Wang Weimin, Xie Gang, *et al.*. 3.8 Lm mid-infrared laser with 11.2 W output power[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(S): 82-85.
彭跃峰, 王卫民, 谢刚, 等. 11.2 W 中红外 3.8 Lm 激光器[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(S): 82-85.
- 4 Yao Baoquan, He Wanjun, Li Yufeng. Technical study of ZnGeP₂ optical parametric oscillator pumped by a 2 μm Tm, Ho:YLF laser

- [J]. Chinese J Lasers, 2005, 32(1): 39-42.
- 姚宝权, 贺万骏, 李玉峰. 2 μm Tm, Ho:YLF 激光抽运 ZnGeP₂ 光参量振荡技术研究[J]. 中国激光, 2005, 32(1): 39-42.
- 5 D G Lancaster. Efficient Nd:YAG pumped mid-IR laser based on cascaded KTP and ZGP optical parametric oscillators and a ZGP parametric amplifier[J]. Opt Commun, 2009, 282(2): 272-275.
- 6 Zhao Yuanyuan, Hou Xia, Chen Weibiao. Reseach and progress of 2 μm all-solid-state lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2006, 43(6): 20-24
- 赵媛媛, 侯霞, 陈卫标. 2 μm 全固态激光器的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2006, 43(6): 20-24.
- 7 Wang Yuezhu, He Wanjun, Yao Baoquan. Tm:Ho:GdVo₄ laser at 2 μm using laser-diode double-end puming[J]. Chinese J Lasers, 2006, 33(6): 730-733.
- 王月珠, 贺万骏, 姚宝权. 激光二极管双端面抽运 Tm:Ho:GdVo₄ 2 μm 激光器[J]. 中国激光, 2006, 33(6): 730-733.
- 8 Yufeng Li, Baoquan Yao, Zhengguo Wang. Tunable CW Tm, Ho:YLF laser at 2 μm [J]. Opt Lett, 2006, 4(8): 470-471.
- 9 Markus Henriksson, Mikael Tiihonen, Valdas Pasiskevicius. ZnGeP₂ parametric oscillator pumped by a linewidth-narrowed parametric 2 μm source[J]. Opt Lett, 2006, 31(12): 1878-1880.
- 10 A Hemming, J Richards, S Bennetts, *et al.*. A high power hybrid mid-IR laser source[J]. Opt Commun, 2010, 283(20): 4041-4045.
- 11 D Creeden, P A Ketteridge, P A Budni, *et al.*. Mid-infrared ZnGeP₂ parametric oscillator directly pumped by a pulsed 2 μm Tm-doped fiber laser[J]. Opt Lett, 2008, 33(4): 315-317.

栏目编辑: 胡冰