

·激光技术·

高功率双端抽运Tm:YAP板条激光器

蔡 军, 丁 宇

(光电信息控制和安全技术重点实验室, 天津 300308)

摘 要:介绍了在室温条件下双端抽运高功率Tm:YAP板条激光器。采用双凹腔结构通过优化泵浦光斑尺寸,在腔内插入双F-P标准具控制激光波长,当抽运功率为164.4 W时,获得了54.7 W的连续输出功率,其斜率效率为44.2%,输出波长为1 938.8 nm,随着功率的增加输出波长只有0.3 nm的漂移,且实现了0.18 nm窄线宽的激光输出,同时测量了10 W、25 W和35 W时的光束质量,分别为3.5、4.1和4.2。

关键词:室温;双端抽运;Tm:YAP;板条

中图分类号:TN248.1

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2017)-02-0009-06

High Power Double-end-pumped Tm:YAP Slab Laser

CAI Jun, DING Yu

(Key Laboratory of Electro-optical Information Control and Security Technology, Tianjin 300308, China)

Abstract: A Tm:YAP slab laser with double-end-pumped and high power under room temperature is introduced. With double concave cavity structure and optimizing pumping facula size, F-P etalon is inserted in the cavity to control laser wavelength. When pumped power is 164.4 W, 54.7 W continuous output power is obtained, the slop efficiency is 44.2% and the output wavelength is 1 938.8 nm. With the increasing of the power, the output wavelength only has 0.3 nm shift and the laser output for 0.18 nm narrow line width is realized. And the optical beam quality is measured when pumped power is 10 W, 25 W and 35 W, which is 3.5, 4.1 and 4.2 respectively.

Key words: room temperature; double-end-pumped; Tm:YAP; slab

2 μm 波段的激光,因处于人眼安全波段和大气弱吸收带,在激光雷达、医学诊断和治疗、材料加工和处理、光电对抗、环境气体检测等领域都有重要应用^[1-2]。在激光雷达应用方面,与CO₂激光器相比,2 μm 激光具有大气消光比低的优点,因此成为激光成像雷达、多普勒相干测风雷达的首选光源^[3]。在激光医疗应用方面,由于水分子对2 μm 激光有强烈吸收,对Tm:YAP 1.94 μm 激光的吸收深度仅为90 μm ,因此使得手术过程中出血较少^[4-5]。相比于只有在塑料中加添加剂才能增加激光吸收的1 μm 激光,2 μm 激光便于吸收能量、熔接和标记,所以在

材料加工和处理等领域有重要应用^[6-7]。此外,还可以作为全固态中红外光学参量振荡器(OPO)的泵浦源,实现3~5 μm 宽带可调谐激光输出^[8]。

目前,可输出2 μm 波长掺Tm的基质材料较多,主要集中于YAG、YLF和YAP这三种,而YAP不仅具备各向异性的特性,还可以抑制较强的热致双折射,损伤阈值较高,稳定性较好,使得以掺Tm的YAP晶体为工作物质的2 μm 激光器在研究上取得了许多进展。2005年,Hamit等人研究了不同掺杂浓度的Tm³⁺对连续输出激光功率的影响,实验结果表明,掺杂浓度为1.5at.%的晶体输出的功率最高,

收稿日期:2017-03-12

作者简介:蔡军(1975-),女,江苏泰兴人,硕士,高级工程师,主要研究方向为激光技术应用。

随着掺杂浓度的增大,激光性能降低^[9]。2009年,Šulc等人报道了一种连续工作、高功率高效率的LD泵浦的Tm:YAP激光器,在入射功率为20.2 W时,可以输出波长为1.99 μm 的功率为6.2 W的线偏振的接近于基模高斯光束的激光,斜效率和光光转换效率分别为34%和31%^[10]。2010年,北京理工大学在室温下用LD泵浦Tm:YAP晶体,使用两个F-P对输出波长进行控制,单频输出波长为1 988 nm,功率344 mW,斜率效率33%^[11]。2012年,大连海事大学用光纤耦合的二极管激光器泵浦掺杂浓度为3at.%的,尺寸为3×3×5 mm³的Tm:YAP晶体,泵浦功率为41.9 W时,实现了波长1.99 μm ,功率为14.7 W激光输出,斜率效率为43.8%^[12]。

采用200 μm 芯径的波长为792 nm两个激光二极管(LD)作为抽运源,以 c 轴切割的Tm:YAP晶体作为工作物质实现1.94 μm 的激光输出,通过采用双凹腔型结构补偿热透镜效应以及计算合适泵浦光斑尺寸,当晶体温度控制在18°,抽运功率为164.4 W时,获得了54.7 W的连续输出功率,斜率效率为44.2%。

1 实验装置

以Tm:YAP为激光晶体的固体激光器,在高功率运转的情况下,热透镜效应比较明显,较强的热透镜效应直接导致谐振腔由稳腔变为非稳腔,也会影响输出激光的光束质量。实验中虽然用板条形状的激光晶体代替块状、棒状激光晶体增加散热,但是热透镜效应依然明显。实验中采用双凹腔来补偿Tm:YAP晶体在高功率运转时较强的热透镜效应,实验装置如图1所示。

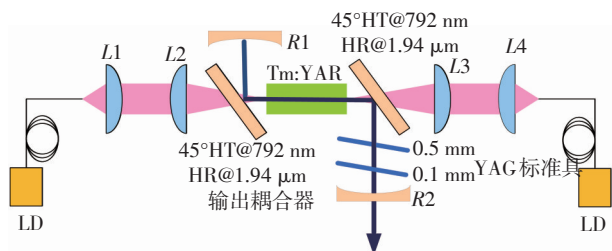


图1 单板条Tm:YAP实验装置图

实验中采用的是双端泵浦激光晶体的实验方案,泵浦源选用的是芯径200 μm 的光纤耦合的半导

体激光器,通过焦距为12 mm和60 mm的聚焦准直镜把泵浦光的光斑变化到0.4 mm左右,通过1.9 μm 高反、792 nm高透的45°镜把泵浦光注入激光晶体内,Tm:YAP晶体尺寸为1.5×6×25 mm³,掺杂浓度为2.2%。谐振腔的腔镜选择的是曲率 $R=500$ mm的1.9 μm 全反镜和 $R=150$ mm的1.9 μm 透过率38%的输出镜,使用双F-P标准具(0.1 mm+0.5 mm)作为波长选择元件。实验中激光晶体用银箔装在紫铜热沉中,谐振腔长度大约为92 mm。

2 实验设计分析

2.1 晶体温度分布

在实验中,常温运转的Tm:YAP板条激光器都是采用上下水冷的制冷方式,控制激光晶体的温度,带走激光器运转过程中产生的热量。固体激光器工作时,随着泵浦功率的增加,介质中心的温度会高于介质边缘的温度,介质内温度、应力分布不均匀,以及介质端面的形变会导致振荡光在激光晶体中传输时等相位面发生变化,为方便分析和求解,假设板条形状的Tm:YAP晶体的各方向热导率为常数,泵浦激光晶体的光束为平顶光束。双端泵浦的晶体内部的温度分布可通过求解热传导方程获得,典型的双端泵浦板条形状激光晶体结构如图2所示。

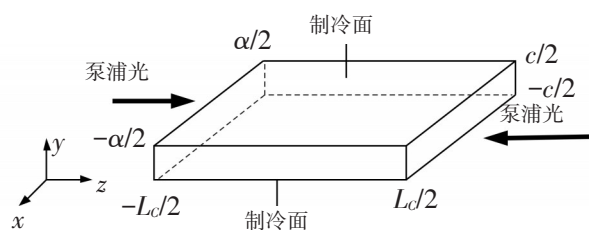


图2 双端泵浦板条形状激光晶体结构图

通过求解热传导方程数值分析了激光晶体不同横截面的温度分布。数值模拟中采用的晶体的尺寸为 $x \times y \times z$ 为6×1.5×20 mm³,晶体初始温度为288 K,在泵浦功率为60 W的情况下,各横截面的温度分布如图3所示。

从图3可以看出,对于端面泵浦的板条型激光器,在垂直于泵浦的横截面内(x - y),晶体中心温度最高,对于实验中使用的晶体,边界温度288 K的情

况下,最高温度为305 K;沿着泵浦光的传输方向(x - z),晶体端面的温度较高,最高温度为322.5 K;对于 y - z 横截面的温度分布而言,边沿温度较高,最高温度为322.5 K。

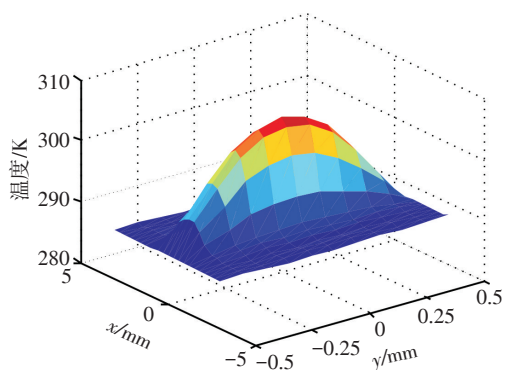
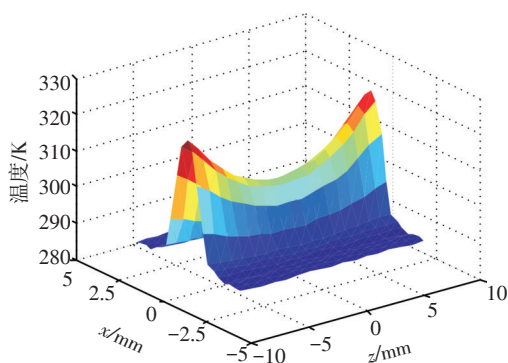
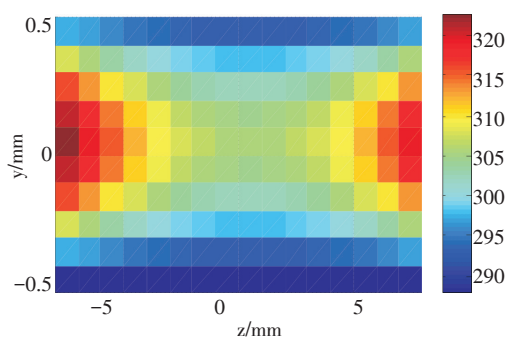
(a) x - y ($z=0$ mm)(b) x - z ($y=0$ mm)(c) y - z ($x=0$ mm)

图3 泵浦功率60 W时Tm:YAP晶体温度分布情况

当选用的聚焦准直镜参数设置为25 mm和100 mm,把热沉温度分别设为15 ℃和20 ℃时,分析比较不同热沉温度对输出激光性能参数的影响,实验结果如图4所示。在此情况下,激光阈值大约为23 W。缩小泵浦光斑后,激光阈值降低,但是

泵浦增加到较高功率时,没有出现斜效率异常的状况。

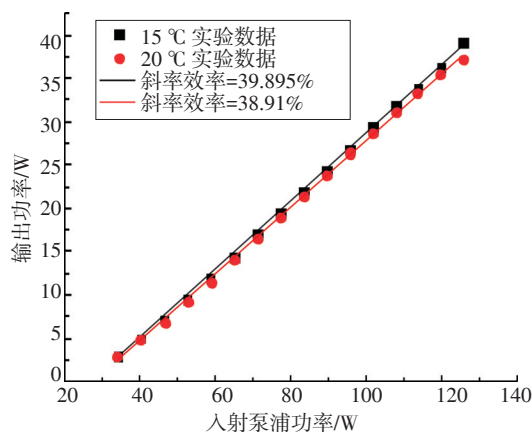


图4 不同热沉温度时激光输出功率随泵浦功率的变化关系

通过分析可知,泵浦光斑越大,激光阈值越高;激光晶体越薄,散热情况越好,激光效率越好;热沉温度越低,斜率效率越高,但是所设定的热沉温度不能过低,否则会导致激光晶体表面有水珠凝集,污染晶体,破坏器件,因此实验中为得到较高功率的激光输出,将热沉温度设定为18 ℃。为平衡激光晶体温度分布,提高泵浦功率极限,选用双端抽运结构。

2.2 热透镜效应补偿

大功率固体激光器的热效应问题是制约固体激光器发展的主要问题,对于Tm:YAP晶体而言,高功率下的热透镜效应问题十分显著,为获得较高功率的激光输出,必须对热透镜效应进行适当的补偿。目前,针对Tm:YAP热透镜效应补偿的研究还没有文献报道,为解决这一问题,借鉴了高功率时也具有严重的热透镜效应的掺Nd³⁺的激光晶体,例如Nd:GdVO₄、Nd:YAG、Nd:YVO₄等激光棒的热透镜效应的补偿方法。该种激光晶体的热透镜效应的补偿方法,主要由以下几种:

(1)合理设计谐振腔补偿激光晶体的热透镜效应。1965年,Siegman等人提出并证明了非稳谐振腔的可行性,并成功应用于气体激光器中,由于非稳谐振腔要求激光介质要有良好的光学质量,直至近年,固体激光介质的光学质量得到大幅度的改

善,此种方法越来越多的应用于固体激光器中。国内外诸多研究单位利用此种方法,获得了高功率、高光束质量的Nd:YAG、Nd:YVO₄激光器。

(2)腔内插入补偿元件补偿激光器增益介质的热透镜效应。例如,北京工业大学的伊丽娜等人报道了“大功率LD端抽运Nd:YAG Z型腔内热效应补偿的研究”,文中就是在Z型腔内加入一个凸透镜,补偿晶体的热透镜效应,实验中获得1.14 W的功率输出。几年之后,德国Hitz等人在谐振腔内插入了一个具有负聚焦作用的,且焦距随泵浦功率变化而变化的透镜,实现了大范围内的补偿,获得良好效果。

(3)加工特殊形状的激光晶体,补偿热透镜效应。韩国朝鲜大学的Sungman等人把Nd:YAG晶体端面加工成凹面,使其具有负透镜效应,并在实验中验证了此种方法的可行性,提高了谐振腔的稳定性,使输出激光的光束质量有所提高。

上述三种方法,是目前在固体激光器中使用较多的补偿热透镜效应的方法。比较而言,腔内插入补偿元件,增大腔内的损耗;加工特殊形状的激光晶体对工艺水平要求比较高,不容易实现。受实验条件所限,合理设计谐振腔结构补偿激光晶体的热透镜效应还是比较可行的,实验中选用这种方法补偿Tm:YAP激光晶体的热透镜效应,取得较好的实验结果。

2.3 双F-P选波长原理

法布里-帕罗(Fabry-Perot简称F-P)标准具一般由两块平行放置的平面玻璃板或者石英板组成的,常在其内表面镀以银膜、铝膜或多元介质膜来提高内表面反射率。腔内加入F-P标准具后,腔内振荡频率与F-P标准具的最大透过率吻合,损耗很小;如果激光振荡器的其他频率通过F-P标准具,损耗很大。Tm:YAP激光器自由振荡输出的波长一般在1.94 μm附近,该波长附近有较多的水吸收峰。1.94 μm附近水吸收情况如图5所示。波长在1 938.5~1 940 nm及1 939.1~1 939.6 nm之间时,基本上水的吸收强度为0;1 939.1~1 939.3 nm之间水的吸收强度很大,如果激光器在运转的过程中输出激光波长在水吸收峰上,则非常容易造成激光器的损

坏。为避免此问题的发生,选用F-P标准具的方法控制激光器的输出波长,由于Tm:YAP固体激光器的振荡波长附近有许多水吸收峰,单个F-P标准具很难实现激光高功率运转情况下的激光波长的稳定控制,所以选择两个厚度不同的F-P标准具作为波长选择元件。实验中选用的F-P标准具参数分别为0.1 mm和0.5 mm厚的YAG标准具。

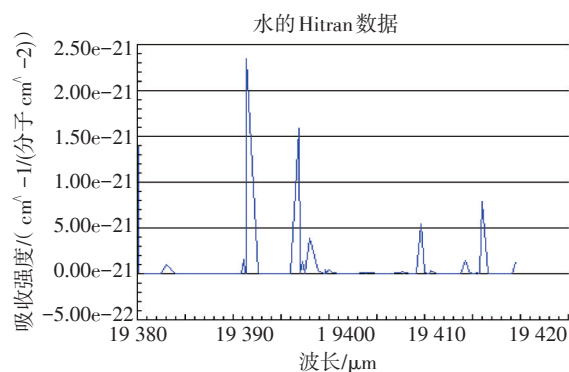


图5 1.94 μm附近水吸收数据图

分析可知,厚度较小的F-P标准具的自由光谱区范围会较宽,对于Tm:YAP固体激光器而言,起到一个初步控制激光振荡波长范围的作用,再用自由光谱区较窄的薄F-P标准具把激光波长控制在1 938.5~1 939.0 nm之间。

两个F-P标准具的透过率函数可以表示为

$$T(\lambda) = T_1(\lambda)T_2(\lambda) = \left(1 - \frac{A_1}{1 - R_1}\right)^2 \frac{1}{1 + F_1 \sin^2\left(\frac{2\pi n_1 d_1 \cdot \cos \alpha_1}{\lambda}\right)} \times \left(1 - \frac{A_2}{1 - R_2}\right)^2 \frac{1}{1 + F_2 \sin^2\left(\frac{2\pi n_2 d_2 \cdot \cos \alpha_2}{\lambda}\right)} \quad (1)$$

其中, R 为标准具各面反射率; A 为法布里-帕罗标准具对激光的损耗($A=1-R-T$); T 代表标准具的透过率(一般情况下,忽略F-P损耗,假设 $A=0$); F 为标准具的精细度($F=4R/(1-R)^2$); λ 为激光波长; n 为标准具材料的折射率; d 为标准具厚度,实验中采用的分别是0.1 mm和0.5 mm; α 为激光进入标准具后的折射角。如图6所示。是运用0.1 mm和0.5 mm的石英F-P标准具同时作用时对波长1 932.0~1 944 nm的透过率图,通过调整折射角,当 $\alpha_1=28.5^\circ$, $\alpha_2=11.6^\circ$ 时实现了1 938 nm附近的波长选择。

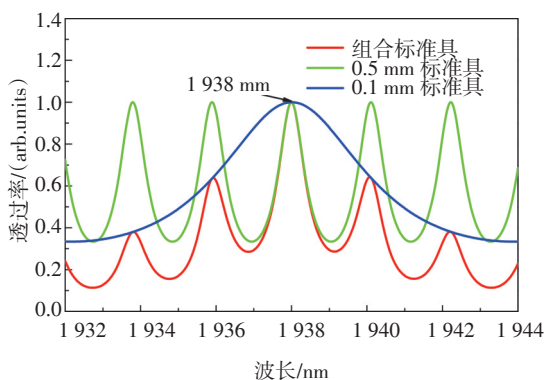


图6 双F-P标准具对波长的透过率图

3 实验结果与分析

实验中选用的晶体尺寸为 $1.5 \times 6 \times 25 \text{ mm}^3$,掺杂浓度为2.2%,采用厚度为0.1 mm和0.5 mm的F-P标准具,把波长限制在1938.5 nm,高功率时即使发生波长偏移,其数值也不超过1940 nm。测得激光阈值大约为35 W,用格兰棱镜测量,发现输出激光为水平偏振。输出的激光功率随泵浦功率的变化关系如图7所示。

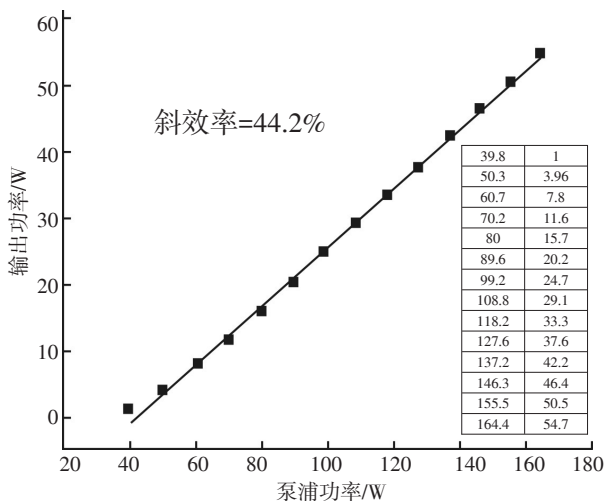


图7 激光输出功率随泵浦功率的变化关系

当晶体温度控制在 18° ,抽运功率为164.4 W时,获得了54.7 W的连续输出功率,斜率效率为44.2%,实验中没有出现由于热透镜效应而引起的功率下降的情况,说明双凹腔型的结构在高泵浦功率时可以很好的补偿Tm:YAP晶体的热透镜效应。

实验中使用波长计测量了Tm:YAP板条激光器连续工作时的输出波长,并采用10/90刀口法测量了该激光器的光束质量,实验中发现,激光器在低

功率运转时,波长为1938.5 nm,随着泵浦功率的增加,激光器输出波长向长波方向偏移,当输出功率增加到47 W时,激光器的输出波长为1938.8 nm,实验结果如图8所示。

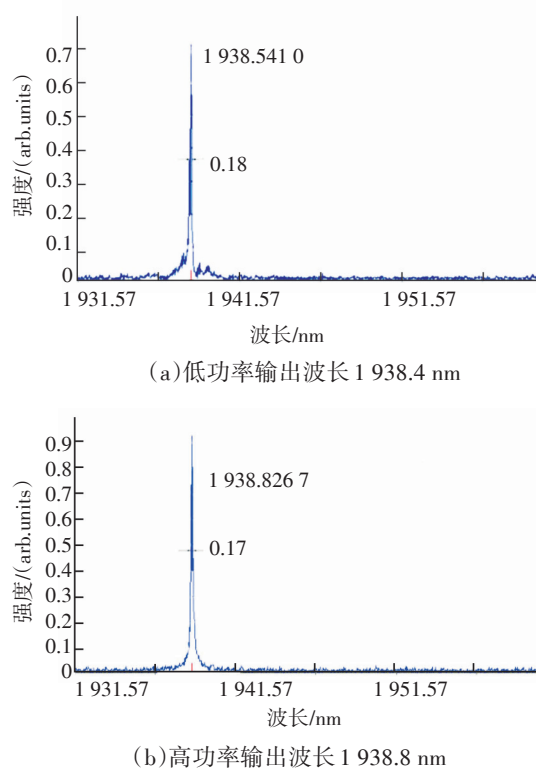


图8 实验测量的不同输出功率下的Tm:YAP激光器的输出波长

实验中采用90/10刀口法测量了光束质量,沿着激光传输的方向,测量不同位置的光斑大小,根据高斯光束的传输方程拟合出腰斑直径,最后算出被测激光束的光束质量,分别测量了10 W、25 W和35 W时的光束质量,分别为3.5、4.1和4.2,实验结果如图9所示。

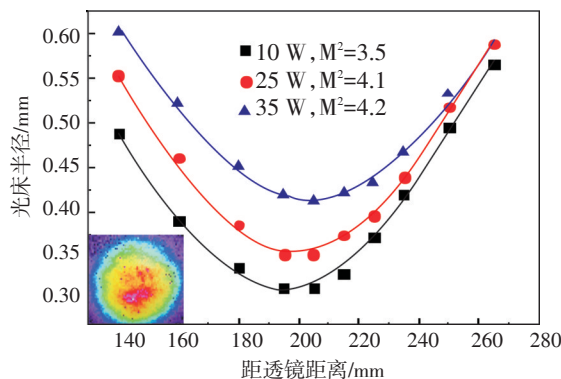


图9 Tm:YAP板条激光器不同激光功率下的光束质量

4 结论

在室温条件下,采用双凹腔结构激光二极管双端抽运 Tm:YAP 板条激光器方案实现了 1.94 μm 的激光输出,选择合适的泵浦光斑尺寸,当晶体温度控制在 18°,获得的最大连续输出功率为 54.7 W 时,斜率效率为 44.2%,通过腔内加入双 F-P 标准具实现了波长的精细控制,随着输出功率的增加,波长只有 0.3 nm 的小幅度漂移,并且都保持了 0.18 nm 的窄线宽激光输出,为获得高效率、高功率的 2 μm 激光提供了有效的途径。

参考文献

- [1] Yang J L, Tang Y L, Xu J Q. Development and applications of gain-switched fiber lasers[J]. *Photo Res* 1 2013:52-57.
- [2] Wulfmeyer V, Randall M, Brewer A, et al. 2- μm Doppler lidar transmitter with high frequency stability and low chirp[J]. *Opt Lett*, 2000, 25:1228-1230.
- [3] Hderson S W, Suni P J M, Hale C P, et al. Coherent laser radar at 2 μm using solid-state lasers [C]. *Geoscience and Remote Sensing*, IEEE Transactions on, 1993, 31 (1): 4-15.
- [4] Temel B, Özgür T, Hamit K, Adnan K, et al. Skin Tissue ablation by Thulium (Tm:YAP) laser at 1980 nm[C]// *Proc. of CLEO*, 2009: CL_P11.
- [5] Thevar T, Barnes N P. Diode-pumped, continuous-wave Tm:YAlO₃ laser[J]. *Appl Opt*, 2006,45:3352-3355 (2006).
- [6] Temel B, Özgür T, Hamit K, et al. Modulated and continuous-wave operations of low-power thulium (Tm:YAP) laser in tissue welding[J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2010, 15(3): 038001.
- [7] Gower M. Industrial applications of laser micromachining [J]. *Opt Express*, 2000, 7(2): 56-67.
- [8] Lippert E, Fonnum H, Arisholm G, et al. A 22-watt mid-infrared optical parametric oscillator with V-shaped 3-mirror ring resonator[J]. *Opt Express*, 2010, 18(25): 26475-26483.
- [9] Hamit Kalaycioglu, Alphan Sennaroglu, Adnan Kurt. Influence of doping concentration on the power performance of diode-pumped continuous-wave Tm³⁺:YAlO₃ lasers[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 2005, 3(11): 667-673.
- [10] Jan Šulc, Helena Jelínková, Karel Nejezchlebb, Václav Škoda. High-efficient room-temperature CW operating Tm:YAP laser with microchip resonator[J]. *Proc of SPIE*, 2009, 7193: 71932H-1.
- [11] Li J, Yang S H. Diode-pumped room temperature single frequency Tm:YAP laser[J]. *Laser Phys Lett*, 2010, 3(7): 203-205.
- [12] Li H S, Zhao M, Xu W H. Experimental study on the 1.94- μm laser performance of c-Cut Tm:YAP crystal with various doping concentration[J]. *Laser Physics*, 2012, 22 (9): 1378-1380.

《光电技术应用》期刊收录情况介绍

《光电技术应用》期刊已成为《中国核心期刊(遴选)数据库》收录期刊、《中文科技期刊数据库》收录期刊、《中国期刊全文数据库》全文收录期刊、《中国学术期刊综合评价数据库》统计源期刊、美国《乌利希期刊指南》收录期刊。期刊的影响因子连续几年上升,2015年入选《中国学术期刊影响因子年报》统计源期刊。

已与万方数据库签订合同,可以同步查询论文内容,更新及时。

因主办单位搬迁,从即日起期刊编辑部通信地址变更:天津市空港经济区纬五道9号,邮编为:300308。电话:022-59067938。投稿邮箱:aoe-cetc@vip.163.com。竭诚欢迎广大读者踊跃投稿。