

文章编号:1001-5078(2019)08-0956-05

· 激光器技术 ·

高重频 LD 泵浦 Er : YSGG 固体激光器

陈 国,冯 江,李 宝,赵书云,苑利钢,魏 磊
(固体激光技术重点实验室,北京 100015)

摘 要:2.7 ~ 3.0 μm 激光器在医疗、军事等方面具有重要的应用价值,本文简单分析了 Er : YSGG 晶体的能级结构以及激光特性,重点描述了采用 968 nm LD 泵浦 Er : YSGG 晶体产生 2.79 μm 激光,在 500 Hz 的泵浦频率下获得最大功率 14.3 W 的 2.79 μm 激光输出,光光转换效率达到 7.1 %,斜效率达到 11 %,同时采用二氧化碲(TeO_2)作为 Q 开关,实现 10 W 的脉冲输出,动静比达到 70 %,脉冲宽度 63.18 ns,这对于 2.79 μm 激光在中长波激光器中的应用具有重要意义。

关键词:高重频;窄脉宽;Er : YSGG;固体激光器

中图分类号:TN248.1 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2019.08.008

High-frequency LD pumped Er : YSGG solid-state laser

CHEN Guo, FENG Jiang, LI Bao, ZHAO Shu-yun, YUAN Li-gang, WEI Lei
(Key Laboratory of Solid-State Laser Technology, Beijing 100115, China)

Abstract:2.7 ~ 3.0 μm laser has important application value in medical and military fields. In this paper, the structure of energy level and the laser characteristics of Er : YSGG crystal were briefly analyzed, and the 2.79 μm laser produced by Er : YSGG crystal pumped by 968 nm LD is emphatically described. The laser has the maximum output power of 14.3 W at the pump frequency of 500 Hz, the optical to optical conversion efficiency reached 7.1 % and the slant efficiency reached 11 %. Meanwhile, tellurium dioxide (TeO_2) is used as Q switch to realize the pulse output of 10 W, the activity ratio reaches 70 %, and the pulse-width is 63.18 ns, which is of great significance for the application of 2.79 μm laser in medium and long wave lasers.

Key words:high frequency; narrow pulse width; Er : YSGG; solid state laser

1 引 言

2.7 ~ 3.0 μm 波段激光处于水的吸收峰,能够激发水分子的高速动能,让水分子成为医疗手术中的切割媒介,在牙科、骨科等领域有着广泛的应用^[1]。同时,2.7 ~ 3.0 μm 波段的激光又是泵浦非线性晶体产生中长波红外激光的优质泵浦源,其波

长更靠近中长波,在非线形转换中,具有更高的量子效率,且在 2.7 μm 泵浦中长波红外光参量振荡器(OPO)时,信号光和闲频光分别对应中波和长波波段,可以通过这种方式实现中长波同时输出^[2]。目前,国内外对 Er : YSGG 晶体产生的 2.79 μm 激光开展了非常广泛的研究,主要研究为氙灯侧泵

作者简介:陈 国(1988 -),男,硕士,工程师,主要从事固体激光器研究以及中长波固体激光器研究。E-mail: cooglebit@qq.com

收稿日期:2019-03-11;修订日期:2019-04-07

Er:YSGG晶体,但用氙灯泵浦时,由于氙灯发光谱线较宽,会导致Er:YSGG晶体的吸收较差,激光转换效率较低,同时带来废热较大,热效应严重,严重影响输出功率的提高^[3],因此开展LD泵浦Er:YSGG的激光特性研究是提高激光输出功率的有效途径,具有重要的实际应用价值。

2 理论分析

光谱研究表明,Er:YSGG晶体在400~2500 nm波段内的吸收谱带主要为Er³⁺的特征吸收^[4-6]。常温下Er:YSGG晶体在400~2500 nm波段的吸收光谱如图1所示。由图1可知,Er:YSGG晶体在487 nm、525 nm、656 nm、790 nm、970 nm及1535 nm附近有明显的吸收峰,分别对应于能级结构图(如图2所示)中Er³⁺从基态⁴I_{15/2}到激发态⁴F_{7/2}、²H_{11/2}、⁴F_{9/2}、⁴I_{9/2}、⁴I_{11/2}及⁴I_{13/2}的跃迁^[7-8]。

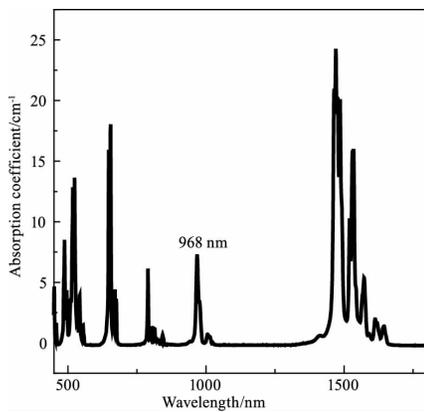


图1 Er:YSGG晶体吸收光谱

Fig. 1 Absorption spectrum of Er:YSGG crystal

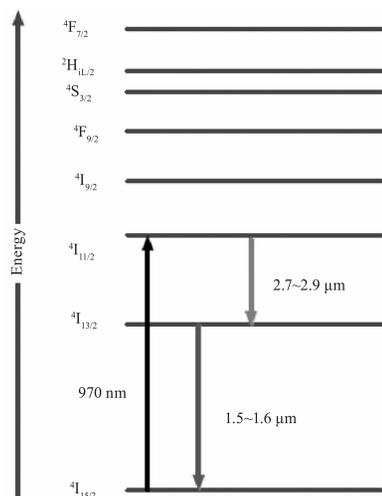


图2 Er:YSGG晶体能级结构

Fig. 2 Energy level structure of Er:YSGG crystal

根据Er³⁺在Er:YSGG晶体中的斯塔克能级^[8-11],968 nm附近谱带对应⁴I_{11/2}→⁴I_{15/2}跃迁;当激发波长为970 nm时发射谱带强度较大。Er:YSGG晶体中Er³⁺上能级⁴I_{11/2}寿命为1.4 ms,下能级⁴I_{13/2}寿命可达到3.4 ms^[12-13],是寿命更长的亚稳态。受激辐射过程中,跃迁下来的粒子积累在⁴I_{13/2}能级上,不利于激光发射过程中保持足够的粒子数反转。因此,原则上说2.79 μm钇激光器是“自饱和”的,激光发射会自行终止。由于⁴I_{13/2}能级上的钇离子之间发生上转换过程⁴I_{13/2}→⁴I_{9/2}^[11],同时也发生⁴I_{13/2}→⁴I_{15/2}的自发辐射,这就使⁴I_{13/2}与⁴I_{11/2}产生离子束反转成为可能^[14-19]。

虽然Er:YSGG晶体在487 nm、525 nm、656 nm、790 nm、968 nm及1535 nm有强吸收峰,但是结合Er³⁺的吸收光谱图以及能级结构图,可以知道产生2.79 μm激光的过程为:⁴I_{15/2}能级的基态粒子通过受激跃迁到⁴I_{11/2}能级,形成粒子束反转并辐射到⁴I_{13/2}能级,并释放出波长为2.79 μm附近的光子形成激光,因此要获得2.79 μm波段的激光必须选用968 nm波长附近的光源作为激励,但是具体的吸收峰值波长在下文将通过实验获得。

3 实验测试

3.1 吸收与发射特性测试

本文采用波长在970 nm附近,波长可以调谐的半导体激光光源照射浓度35%、长度3 mm的晶体,得出了晶体的吸收曲线如图3所示。图3表明晶体在959~973 nm波段的单次吸收都在86.5%以上,晶体吸收谱线较宽,吸收谱宽大于等于14 nm。吸收谱较宽,便于选择合适的半导体激光泵浦源进行泵浦。其中在968 nm处表现出吸收最强,通过计算,此处的吸收系数为7.8 cm⁻¹,有利于形成巨大的粒子数反转。

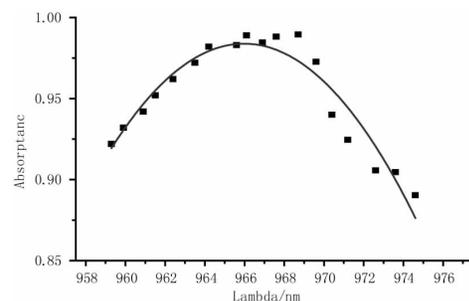


图3 晶体吸收曲线

Fig. 3 Crystal absorption curve

采用分光光度计测试了 Er : YSGG 的荧光曲线如图 4 所示,在 2.79 μm 处有最强的发射峰。

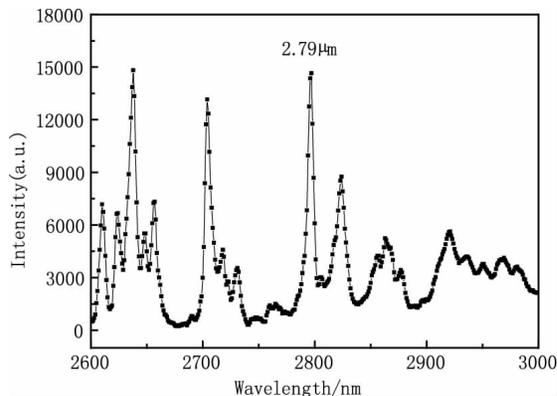


图 4 Er : YSGG 晶体的发射光谱

Fig. 4 The emission spectrum of Er : YSGG crystal

3.2 Er : YSGG 激光器实验装置

实验装置如图 5 所示,采用三块 968 nm LD 线阵组成的侧泵模块侧面泵浦 Er : YSGG 晶体的方式来实现激光输出。LD 峰值波长为 968 nm,谱宽 3.1 nm,正好处于晶体的吸收峰值。晶体为掺杂浓度 35 % 的 Er : YSGG,直径为 3 mm,长度为 90 mm,双端键合,键合长度为两端各 15 mm。侧面为三维 968 nm 脉冲 LD 线阵,水温控制在 25 $^{\circ}\text{C}$ 。

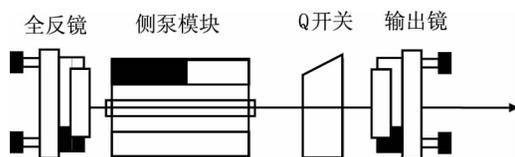


图 5 激光器结构图

Fig. 5 Structure diagram of the laser

由于 Er : YSGG 热透镜效应较严重,平平腔在高功率下容易失谐,因此采用双凹腔对热透镜进行修复,实现稳定输出。在激光器后镜上镀有 2.6 ~ 3.0 μm 全反射膜,输出镜上镀 2.6 ~ 3.0 μm 半透半反膜 ($T = 10\%$)。

晶体本身转换效率低,因此采用声光调 Q 的方式将极大的减少插入损耗。二氧化锆晶体制作的声光 Q 开关,激光透过率大于 99 %,对激光进行调制,实现窄脉宽激光输出。

实验过程中,LD 泵浦模块与 YSGG/Er : YSGG 晶体均采用水冷装置进行冷却,温度控制在 25 $^{\circ}\text{C}$ 。激光输出功率采用 OPHIR 的 NOVA II 型激光功率计测量,激光光谱仪采用 IR550 型红外光谱仪,测量

精度 0.02 nm。

4 实验结果与分析

4.1 高功率 2.79 μm 静态输出

由于晶体本身热导率不高,热透镜效应严重,连续泵浦会严重影响激光器的出光效率甚至对晶体带来严重破坏,为减小激光器的散热压力以及避免破坏,采用重频为 500 Hz 的脉冲电源驱动 968 nm LD 抽运 Er : YSGG,将谐振腔调至最佳时,实现 14.3 W 2.79 μm 激光输出,光光转换效率达到 7.1 %,斜效率达到 11 %,激光脉冲宽度为 1 μs ,图 6 为激光器输出功率曲线。采用红外光谱仪对激光光谱进行扫描,得到光谱图如图 7 所示。激光器输出的激光波长峰值为 2792.6 nm,谱宽 (FWHM) 为 1.94 nm。

4.2 动态输出

为实现高功率输出,采用声光调 Q 的方式。Q 晶体采用二氧化锆,由于 Q 晶体表面膜层损伤阈值的限制,在 500 Hz 下,实现了 10 W、2.79 μm 激光光输出,单脉冲能量 2 mJ,动静比达到 70 %,脉宽 63.18 ns,如图 8 所示。

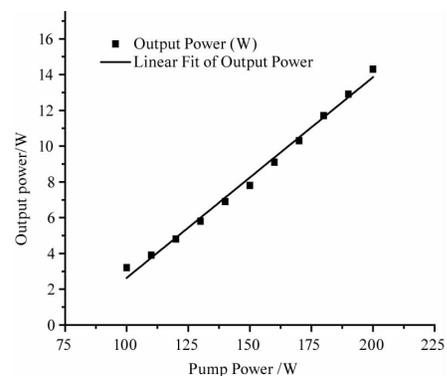


图 6 激光器输出功率曲线

Fig. 6 Output power curve of the laser

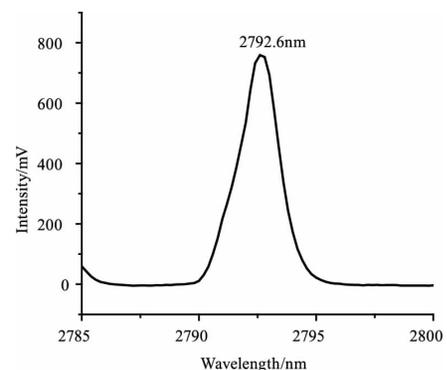


图 7 输出光谱图

Fig. 7 Spectrum of crystal

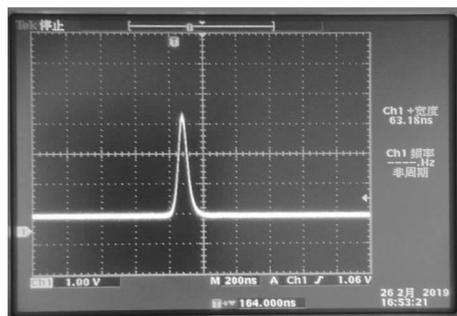


图8 激光脉宽采集图

Fig. 8 Figure of pulse-width

4.3 实验分析

实验中发现,随着泵浦功率的增加,晶体的热透镜越来越严重,在泵浦功率超过 200 W 时,激光器的转换效率开始下降,再增加功率将导致激光器谐振腔失谐引起功率下降。

同时 2.79 μm 激光器器件的镀膜水平极大地限制了激光器功率水平的提升,经测试,目前该波段膜层的损伤阈值只能达到 20 ~ 30 MW/cm^2 ,如果能提高到 500 MW/cm^2 的水平,将大大改善激光器的输出功率水平。

5 结论

本文采用重频 500 Hz 的脉冲 LD 抽运浓度 35 % 的 Er:YSGG 晶体,实现 14.3 W、2.79 μm 静态输出,同时实现 10 W 动态输出,动静比达到 70 %,重要的是在 500 Hz 高频率下实现大于 320 MW 的峰值功率输出,同时输出的谱宽很窄 (1.94 nm),为 2.79 μm 泵浦光参量振荡器,实现中波、长波一体化输出成为可能。本文实现指标也是目前国内公开报道的 2.79 μm 、高重频、窄脉冲激光器的最高指标。为了进一步提高该类激光器的功率水平,需要激光器的散热性能,减少热透镜效应,同时需要提升器件的镀膜水平。

参考文献:

[1] XIE Pinhua, LIU Wenqing. New application of erbium laser in medicine[J]. Optoelectronic Technology and Information, 1997, 10(4): 5 - 11. (in Chinese)
谢品华, 刘文清. 钕激光器在医学中的新应用[J]. 光电技术与信息, 1997, 10(4): 5 - 11.

[2] YAO Baoquan. Analysis of development of mid-infrared optical parametric oscillator[J]. Laser Technology, 2002, 26(3): 8 - 10. (in Chinese)

姚宝权, 中红外光参量振荡器发展状况分析[J]. 激光技术, 2002, 26(3): 8 - 10.

- [3] LIU Jinsheng. Development status of 2.79 μm Cr, Er: YSGG solid-state laser[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(2): 217 - 220. (in Chinese)
刘金生. 2.79 μm Cr, Er: YSGG 固体激光器发展现状[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(2): 217 - 220.
- [4] Dinerman B J, Moulton P F. Up-conversion luminescence of Er^{3+} Yttrium [C]//Gallium; Conference Proceedings of IEEE LEOS' 92 Annual Meeting, 1992. 310 - 311.
- [5] Fried N M, Yang Y B, Chaney C A, et al. Transmission of Q-switched erbium: YSGG ($\lambda = 2.79 \mu\text{m}$) and erbium: YAG ($\lambda = 2.94 \mu\text{m}$) laser radiation through germanium oxide and sapphire optical fibres at high pulse energies [J]. Lasers in Medical Science, 2004, 19: 155 - 160.
- [6] Georgescu S, Toma O, Totia H. Intrinsic limits of the efficiency of erbium 3 μm lasers [J]. IEEE Journal of Quantum Electron, 2003, 39(6): 722 - 732.
- [7] Pollnau M, Graf T, Balmer J E, et al. Explanation of the CW operation of the Er^{3+} 3 μm crystal laser [J]. Physical Review A, 1994, 49(5): 3990 - 3996.
- [8] Z Tikerpae M, Jackson S D, King T A. Theoretical comparison of Er^{3+} doped crystal lasers [J]. Journal of Modern Optics, 1998, 45(6): 1269 - 1284.
- [9] Meister J, Franzen R, Apel C, et al. Multireflection pumping concept for miniaturized diode-pumped solid-state lasers [J]. Applied Optics, 2004, 43(31): 5864 - 5869.
- [10] Meister J, Franzen R, Apel C, et al. Multireflection pumping concept for miniaturized diode-pumped solid-state lasers [J]. Applied Optics, 2004, 43(31): 5864 - 5869.
- [11] Liu J S, Liu J J, Tang Y. Performance of a diode end-pumped Cr, Er: YSGG laser at 2.79 μm [J]. Laser Physics, 2008, 18(10): 1124 - 1127.
- [12] SU Jing. Crystal structure and spectral properties of Er: YSGG laser crystals [J]. Journal of Functional Materials, 2008, 5(39): 717 - 720. (in Chinese)
苏静. Er: YSGG 激光晶体的晶体结构和光谱性能 [J]. 功能材料, 2008, 5(39): 717 - 720.
- [13] CHEN Jiakang, SUN Dunlu, ZHANG Huili, et al. Research progress in the rare-earth-doped laser crystals [J]. Journal of Synthetic Crystals, 2013, 42(5): 824 - 832.

- (in Chinese)
- 陈家康,孙敦陆,张会丽等. 2.7-3 μm 稀土激光晶体研究进展[J]. 人工晶体学报,2013,42(5):824-832.
- [14] XU Dongyong, ZANG Jingcun. Progress of study on up-conversion laser & luminescent materials[J]. Journal of Synthetic Crystals,2001,30(5):203-206. (in Chinese) 徐东勇,臧竞存. 上转换激光和上转换发光材料的研究进展[J]. 人工晶体学报,2001,30(5):203-206.
- [15] Maak P, Jakab L, Richter P, et al. Efficient acousto-optic Q switching of Er:YSGG lasers at 2.79 μm wavelength [J]. Applied Optics,2000,39(18):3053-3059.
- [16] Park Y H, Kong H J, Kim Y S, et al. 2.70 μm emission Er:Cr:YSGG laser with LiNbO_3 pockels cell [J]. Laser Physics Letters,2009,6(3):198-202.
- [17] Ozolinsh M, Eichler H J. 2.79 μm erbium laser with lead-lanthanum zirconate titanate ceramics electro-optic Q-switching output coupler [J]. Applied Physics Letters, 2000,77(5):615-617.
- [18] Park Y H, Lee D W, Kong H J, et al. Dynamics of a flashlamp pumped 2.70 μm emission Cr:Er:YSGG laser with an infrared quartz FTIR shutter [J]. Journal of Optical Society of America B, 2008, 25(12): 2123-2129.
- [19] Lupei V, Georgescu S, Florea V. On the dynamics of population inversion for 3 μm Er^{3+} lasers [J]. IEEE Journal of Quantum Electron, 1993,29(2):426-434.