

doi:10.3788/gzxb20174602.0214002

双波长 Yb : YAG 连续激光理论及实验研究

庄凤江, 李享, 林志阳

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

摘 要:报道了 Yb : YAG 双波长激光振荡阈值的理论结果, 实验获得了连续双波长激光输出. 实验中, 采用紧凑的平凹腔结构、940 nm 光纤耦合 LD 端面泵浦方式, Yb : YAG 晶体作为激光晶体, 采用 10%、15% 和 20% 的输出耦合镜, 分别实现了单波长和双波长激光输出, 在最高泵浦功率为 20 W 时, 输出耦合率分别为 10%、20%, 最高获得 3.94 W 的 1 050 nm 激光和 3.40 W 的 1 030 nm 激光, 对应的光光转换效率分别为 19.7% 和 17.0%; 当输出耦合率为 15%、泵浦功率为 11.7 W 时, 获得 0.79 W 的双波长激光, 对应的光光转换效率为 6.8%, 功率比为 1 : 1.3, 通过光栅光谱仪测量得到双波长谱线中心分别为 1 030.31 nm 和 1 047.50 nm; 当 1 030 nm 激光功率为 3.0 W 时, 30 min 内输出功率 RMS 稳定性优于 0.18%. 该实验结果与理论分析相吻合, 可应用于设计稳定可靠的掺 Yb 双波长激光器.

关键词: Yb : YAG; 双波长; 准三能级; LD 泵浦; 输出耦合率

中图分类号: TN248.1; O434.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4213(2017)02-0214002-7

Theoretical and Experimental Investigation of Dual-wavelength Continuous-wave Yb : YAG Laser

ZHUANG Feng-jiang, LI Xiang, LIN Zhi-yang

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021, China)

Abstract: The theoretical results of the oscillated threshold for dual-wavelength, continue-wave Yb : YAG laser were presented, and then its output was experimentally investigated. In our experiment setup, a plane-concave cavity was employed for laser oscillating by end-pumping with a 940nm fiber coupling laser diode. A Yb : YAG crystal was taken as the laser crystal in the cavity. The single wavelength and dual-wavelength laser were respectively obtained by using the Output Coupling (OC) of 10%, 15%, and 20%. At the highest pump power of 20W, the maximum output power at 1 050 nm is 3.94 W at the OC of 10% and the maximum output power at 1 030 nm is 3.40 W at the OC of 20%. The corresponding optical to optical conversion efficiencies are 19.7% and 17.0%, respectively. At the output coupling of 15%, the dual-wavelength output power of 0.79 W was obtained at the pump power of 11.7 W, corresponding to an optical-to-optical conversion efficiency of 6.8%. It is experimentally found that the output power ratio $P_{1\ 030\ \text{nm}}/P_{1\ 050\ \text{nm}}$ was about 1 : 1.3. The central wavelengths of the dual-wavelength laser were located at 1 030.31 nm and 1 047.50 nm by using a grating spectrometer. At an output power at 1 030 nm of 3.0 W, its output power stability of RMS is determined to be better than 0.18% in a 30 min operation. The proposed model gives results that agree fairly well with the experimental data. Our results suggest that high efficient, compact stable Yb-doping dual-wavelength lasers can be designed from our model.

Key words: Yb : YAG; Dual wavelength; Quasi-three level; LD pumped; Output coupling

OCIS Codes: 140.3615; 140.3325; 140.3410

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 61505058, 11504116)和福建省自然科学基金(No. 2015J09005)资助

第一作者:庄凤江(1986-),男,讲师,博士,主要研究方向为全固态激光技术. Email: fjzhuang@gmail.com

收稿日期:2016-08-22; **录用日期:**2016-10-09

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

双波长激光在干涉彩虹全息、精细激光光谱、差分吸收激光雷达、激光医学、光通信等领域具有广泛应用,并成为当前国内外激光技术研究的热点之一^[1-3].目前,最引人关注的双波长激光器可同时输出两个波长相近的激光,这类激光器具有独特的应用价值,特别是,基于非线性光学差频技术对波长相近的双波长激光进行光学差频,可作为产生相干 THz 光源的技术之一^[4-5].太赫兹波是指频率在 0.1~10 THz 范围的电磁波,波长大概在 0.03~3 mm 范围内,介于微波与红外之间^[6].由于太赫兹能量很小,不会对物质产生破坏作用,所以与 X 射线相比更具有优势.太赫兹的独特性能使其广泛应用在通信雷达、电磁武器、医学成像、无损检测、安全检查等领域^[7-9].在近红外波段,若基于非线性光学差频技术获得太赫兹波,就要求双波长激光的波长间隔从 1 nm 至几十 nm 的范围内.因此,产生与太赫兹波频率对应的双波长激光具有重要的研究价值.

双波长激光研究主要采用全固态激光器结构,以获得高效紧凑、光束质量好的双波长激光输出.这类激光器一般通过激光晶体的物理性能或多个激光晶体以实现双波长同时输出;其中,激光基本理论研究和谐振腔设计是获得双波长激光的重要环节.近年来,通过激光晶体的选择和控制是获得波长相近的双波长激光的最有效手段之一.2015 年,文献[4]报道了采用混晶方法,获得波长 1.0 μm 附近的双波长激光.2014 年,文献[5]报道了采用 Nd:YVO₄ 和 Nd:GdVO₄ 双晶体,获得 1 064.38 nm 和 1 063.18 nm 双波长激光输出,对应 0.32 THz 的频率间隔.2010 年,文献[10]报道了采用平凹腔实现 Nd:YAG 激光陶瓷中 Nd 离子在 1.3 μm 波段两条主要跃迁谱线 1 319 nm 和 1 338 nm 双波长激光输出.然而,目前基于掺 Yb 的激光晶体在 1.0 μm 附近的双波长激光较少^[11-12].本文在此前报道的 Yb:YAG 研究基础上^[13],通过理论分析计算得到 1 030 nm 和 1 050 nm 双波长激光振荡的阈值,实现双波长 Yb:YAG 连续激光的同时输出,对应的频率间隔可达 5.54 THz,可作为有效的太赫兹产生源.

1 理论分析

Yb:YAG 晶体具有许多优良的特性,被广泛应用于各种全固态激光器的设计中^[14-17].Yb:YAG 不仅在 940nm 处具有非常宽的吸收带;并且在 1 030 nm 处具有相当宽的发射带宽,其上能级寿命长达 951 μs ,量子效率高达 91.4%.如图 1, Yb³⁺ 是能级结构最简单的激活离子,仅有一个基态 ²F_{7/2} 和一个激发态 ²F_{5/2}.在晶体场作用下,能级产生 Stark 分裂,形成准三能级激光运行机制.在 940 nm 的 LD 泵浦下, Yb:YAG 存在两个主发射峰,分别位于 1 030 nm 和 1 050 nm.1 030 nm 和 1 050 nm 的激光下能级的 Boltzmann 因数分别为 0.046 和 0.02.与 1 050 nm 相比,1 030 nm 激光下能级由于有较多的粒子数分布,使其存在着更严重的重吸收效应,以实现粒子数反转.另一方面,1 030 nm 处的发射截面比 1 050 nm 处的大 6~7 倍.在 1 030 nm 处,虽然存在重吸收损耗,但是其发射谱线更强.在上能级积累足够多的粒子的情况下,仍可以漂白重吸收损耗后形成振荡.因此,理论研究和控制双波长激光的振荡阈值是实现 1 030 nm 和 1 050 nm 激光的同时振荡输出的关键途径.

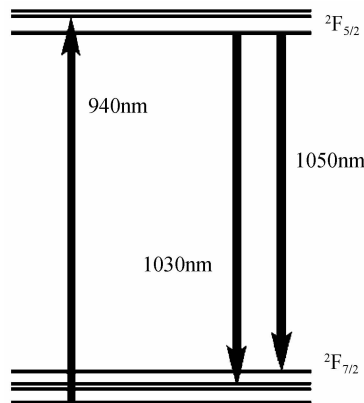


图 1 Yb³⁺ 离子在 Yb:YAG 中的能级分布图

Fig. 1 Energy levels of Yb³⁺ ions in Yb:YAG

采用经典的激光器理论,对于 Yb:YAG 的 1 030 nm 准三能级激光系统和 1 050 nm 四能级系统模型,

分析泵浦光和激发光的输出特性,可得激光的输出功率 P_{out} 与泵浦功率 P_p 具有的线性关系^[18-19]为

$$P_{out} = \eta_{slope} (P_p - P_{th}) \quad (1)$$

$$\eta_{slope} = \eta_{mode} \eta_{del} \frac{\nu_1}{\nu_p} \frac{1-R(1-e^{\sigma_p N_{2p}})(1+R_p e^{\sigma_p N_{2p}})}{R(e^{\sigma_l N_{21}}-1)(T^2 e^{\sigma_l N_{21}}+1)} \quad (2)$$

$$P_{th} = \frac{h\nu_p N_2 A}{\eta_{del} \tau} \frac{1}{(1-e^{\sigma_p N_{2p}})(1+R_p e^{\sigma_p N_{2p}})} \quad (3)$$

式中, η_{slope} 为泵浦斜率效率; P_{th} 为泵浦阈值功率; ν_1 , ν_p 分别为激发光及泵浦光的频率; h 为普朗克常量; R 为输出耦合镜反射率; R_p 为激光棒末端对泵浦光反射率; T 为基频光在腔内的单程透过率, 不计重吸收和输出耦合的损耗; τ 为上能级的寿命; σ_l 为激光发射截面; σ_p 为泵浦吸收截面; A 为泵浦光斑面积; η_{mode} 为泵浦光与基波匹配因子; η_{del} 为泵浦转化因子; N_2 为激发态粒子数密度; N_{21} , N_{2p} 为消耗及产生的反转粒子数密度.

基于上述激光理论模型分析了端泵 Yb : YAG 晶体的激光输出特性. 在理论分析中, 不妨假定采用 940 nm 的泵浦源, 由光纤耦合输出. 泵浦光斑半径约为 125 μm ; 激光晶体长度为 10 mm; 掺杂浓度约为 5at. %. Yb : YAG 晶体的相关光谱参量可以由文献[18, 20-21]获得. 根据上述模型及相关参量, 通过式(3), 可以得到激光泵浦阈值与输出镜耦合率(Output Coupling, OC)之间的关系, 如图 2. 图中给出输出镜反射率在(0.6, 1), 即输出耦合率在(0.4, 0)时, 激光泵浦阈值的变化曲线. 从图中曲线变化可以看出, 随着输出镜反射率的增大, 泵浦阈值功率不断减小. 一般地, 输出镜耦合率越小, 激光输出所需的泵浦阈值则越小; 图中曲线的变化趋势与此相吻合. 对于 1 050 nm 的四能级激光系统, 泵浦阈值功率随着耦合率的减小而明显减小, 从约 14 W 下降至不到 4 W. 然而, 对于 1 030 nm 准三能级系统而言, 泵浦阈值功率随着耦合率的减小下降较小. 这主要是由于 1 030 nm 处的受激发射截面比 1 050 nm 处的大 6~7 倍, 较强的 1 030 nm 发射谱线受耦合率的影响较小. 另一方面, 从图 2 可以看出, 1 030 nm 激光泵浦阈值在 6 W 到 8 W 之间. 当 OC 小于 10% 时, 1 050 nm 激光泵浦阈值下降至 6 W 以下; 显然, 四能级系统的泵浦功率阈值低于准三能级系统. 理论结果表明, 在 OC 小于 10% 时, 1 050 nm 激光泵浦阈值更小, 易于起振; 当 OC 大于 15% 时, 1 030 nm 激光泵浦阈值小更易起振. 图 2 中指出了双波长激光的输出耦合率的大致范围. 当 OC 为 14% 时, 可见双波长激光阈值相等, 阈值功率为 6.8 W. 因此, 根据理论分析结果, 要同时获得 1 030 nm 和 1 050 nm 双波长激光输出, 其输出耦合率应位于 13~15% 之间. 一般情况下, 双波长激光同时振荡不要求阈值严格相等. 通过对泵浦参量和腔内其它损耗的控制, 双波长激光输出耦合率的范围应更宽. 我们将结合理论分析结果和实验装置, 开展对 1 030 nm 和 1 050 nm 双波长激光输出的实验研究.

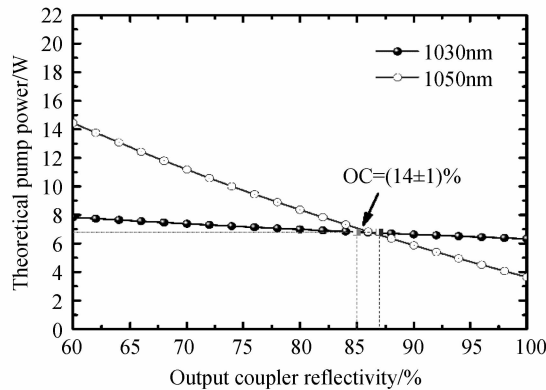


图 2 双波长 Yb : YAG 激光阈值泵浦功率

Fig. 2 The threshold pump power of dual-wavelength Yb : YAG laser

图 3 给出了 10% 和 20% OC 时, 理论激光输出功率随着泵浦功率的变化曲线. 从图中可以看出, 当输出耦合率为 10% 时, 1 050 nm 激光理论泵浦阈值功率为 5.9 W, 随着泵浦功率增加至 20 W 时, 最高可获得理论输出功率为 5.7 W, 对应光光转换效率为 28.5%, 斜率效率为 40.7%. 当采用 20% 输出耦合率时, 1 030 nm 激光理论泵浦阈值功率为 7.1 W, 随着泵浦功率增加至 20 W 时, 最高可获得理论输出功率为 6.2 W, 对应光光转换效率为 31%, 斜率效率为 48%. 对于较为简单的 1 050 nm 四能级激光系统, 输出功率与泵浦功率一般呈现较好的线性关系, 随着泵浦功率增加, 激光输出功率将线性增加. 对于准三能级 1 030 nm 激光系

统,由于增益介质的重吸收和热效应影响,实际的斜率效率一般不为定值,随着泵浦功率增加,输出功率与泵浦功率将呈现一定的非线性特征.在较高的泵浦功率下,激光工作物质引起的热效应将导致输出功率和输出效率的降低.同时,可能引起激光谐振腔的失稳.因此,在这种情况下,斜率效率一般呈现近似的线性关系.对于双波长激光的情况,由于同时存在两种激光振荡,随着泵浦功率增加,激光输出功率将呈现明显的非线性关系.

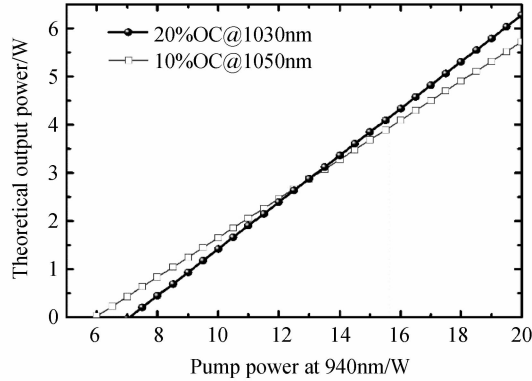


图3 10%和20%OC时理论输出功率

Fig. 3 The theoretical output power at the output coupling of 10% and 20%

2 实验装置

本实验装置如图4,采用平凹直腔结构.实验装置主要由LD泵浦源、耦合透镜系统、输入镜 M_1 、Yb:YAG激光晶体及输出耦合镜 M_2 组成.实验中,采用LD模块端面泵浦,经过耦合系统后最大泵浦功率接近20W,输出波长为940nm,耦合光纤数值孔径为0.22,芯径为 $105\mu\text{m}$ (凯普林光电).采用耦合比为1:2的耦合透镜系统将泵浦光聚焦到激光晶体上.Yb:YAG激光晶体中, Yb^{3+} 掺杂浓度约为5-at.%,其尺寸为 $4\times 4\times 10\text{mm}^3$.激光晶体两端面均镀 $1.0\mu\text{m}$ 的增透膜;其被放置在TEC温度控制器上,温度控制在 $25.0\pm 0.1^\circ\text{C}$. M_1 为平凹镜,其曲率 $R=150\text{mm}$,镀有 $1.0\mu\text{m}$ 高反膜和940nm的高透膜,作为双波长激光器的输入镜. M_2 为平平镜,作为双波长激光器的输出镜.在1020~1070nm波段镀有部分反射膜,透过率 T 分别为10%、15%和20%.整个激光谐振腔腔长为65mm.实验中,采用Ophir-NovaII激光功率计测量双波长激光的输出功率.采用Sandhouse光栅光谱仪(SIR-3400)确定输出激光的波长.

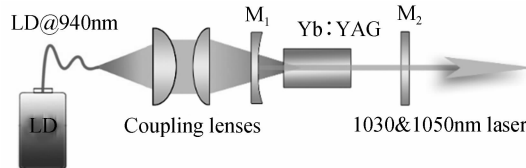


图4 Yb:YAG激光实验装置

Fig. 4 The schematic arrangement of Yb:YAG laser

3 实验结果与分析

图5给出了输出耦合率为10%和20%时,Yb:YAG激光输出功率与泵浦功率的关系;同时通过光栅光谱仪分别确定对应的激光输出波长.如图5,采用10%输出耦合率时,1050nm激光的泵浦阈值功率为7.3W;当泵浦功率为20W时,最高获得3.94W的1050nm激光,对应的光光转换效率为19.7%.通过线性拟合得到,对应的斜率效率为31.6%,呈现明显的线性关系.与理论结果相比,实际阈值功率略为偏大和对应的效率则偏小;这主要是由于实际腔内的损耗、激光晶体光谱参量的偏差以及温度的影响导致的.其中,激光晶体的温度变化会引起Boltzmann因数的改变.若降低晶体的温度,将使激光下能级的Boltzmann布居数变小,有利于减小激光阈值和提高激光输出功率.当输出耦合率为20%,1030nm激光的阈值功率为9.2W;泵浦功率为20W时,最高获得3.40W的1030nm激光,对应的光光转换效率为17.0%,线性拟合的斜率效率为31.3%.从图中可以看出,与四能级的1050nm激光相比,1030nm激光的线性关系有所降

低,这正是由于激光工作物质的重吸收和热效应导致的.实验结果表明,当输出耦合率较小时,激光腔内功率较大,会消耗反转粒子数,上能级无法积累足够多的反转粒子,难以漂白重吸收引起的损耗,实现 1 030 nm 激光振荡.当输出耦合率较大时,激光腔内可以积累反转粒子数,形成 1 030 nm 激光振荡.1 050 nm 激光输出曲线呈现良好线性关系,是由于四能级系统的下能级几乎没有粒子数;而准三能级系统则会受到重吸收的影响.此外,图中未出现明显的功率饱和现象,所以通过增加泵浦功率可以获得更高的输出功率.

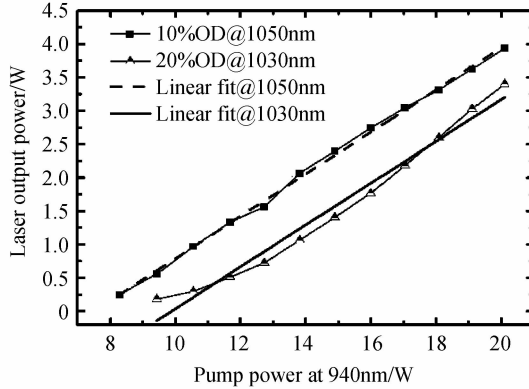


图 5 10%和 20%OC 激光输出功率关系

Fig. 5 Laser output power at the output coupling of 10% and 20%

图 6 为输出耦合率为 15%时,激光输出功率与泵浦功率的关系.采用 15%OC 时,激光输出的阈值功率为 7.7 W;与理论分析结果相比,实际阈值功率略为偏大.实验过程中我们发现,当泵浦功率超过阈值时,位于 1 050 nm 的谱线优先振荡并有微弱的 1 030 nm 起振.增加泵浦功率后,当泵浦功率为 11.7 W 时,可观察到较为均衡的双波长激光输出.此时,获得 0.79 W 的双波长激光,对应的光光转换效率为 6.8%.1 030 nm 功率与 1 050 nm 功率之比约为 1 : 1.3.图 6 左上插图显示,双波长激光的精确谱线分别位于 1 030.31 nm 和 1 047.50 nm.随着泵浦功率继续增大,1 050 nm 谱线则被抑制.当泵浦功率接近 15 W 时,只观察到 1 030 nm 激光输出,如图 6 右下插图.最终,在最高泵浦功率为 20 W 时,获得 3.71 W 的 1 050 nm 激光,对应的光光转换效率为 18.6%.在图 6 中,有明显的拐点区域,出现了双波长向 1 050 nm 过渡的阶段,未见明显的线性关系.这是四能级系统和准三能级系统共同作用的结果,激光输出功率呈现明显的非线性关系,与理论分析相吻合.

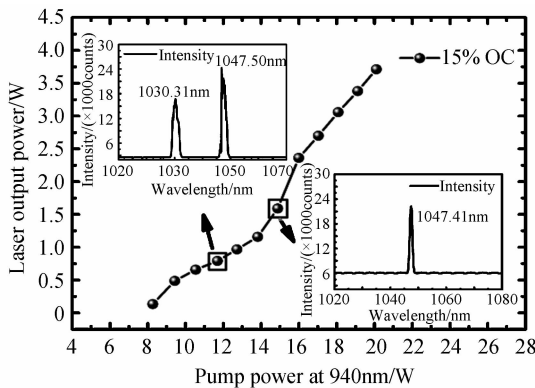


图 6 15%OC 时激光输出功率关系

Fig. 6 Laser output power at the output coupling of 15%

该实验结果表明,在 15%OC 时,可以获得 Yb : YAG 双波长激光输出.但是,随着泵浦功率的增加,激光晶体热耗散变大,重吸收损耗增加.四能级的 1 050 nm 谱线则起振进而抑制了准三能级的 1 030 nm 谱线.从图 6 可以看出,当泵浦功率大于 16W 后,只有 1 050 nm 振荡,激光输出功率开始呈现良好的线性关系.若要进一步增强双波长激光的输出功率,则需要优化实验装置.通过连续改变输出耦合镜的透过率或腔内损耗,仍可以实现有效的双波激光输出.

通过激光功率计分别测量了 1 030 nm、1 050 nm 激光及双波长激光的输出稳定性.实验结果表明,各波长激光的 RMS 功率稳定性均优于 0.2%,实验中未见明显的功率起伏变化.这是因为在简单的直腔内不存

在复杂的多损耗的动态变化;而激光晶体的谱线输出已是增益宏观平衡的结果.当1 030 nm激光功率为3.0 W时,30 min内输出功率RMS稳定性优于0.18%,如图7.对于准三能级的1 030 nm激光,输出功率的稳定性主要决定于重吸收和热效应的影响.因此,控制激光晶体的温度并及时带走产生的热量可以有效地提高激光的稳定性.最后,通过激光光束分析仪测量和分析得到,各波长激光的 M^2 因子均小于1.3.其中,图8示出1 030 nm激光的光斑分布,呈现良好的高斯分布.这是由于良好的泵浦光斑模式匹配和谐振腔设计决定的.通过端面泵浦和平凹腔结构可以获得光束质量好的激光输出.

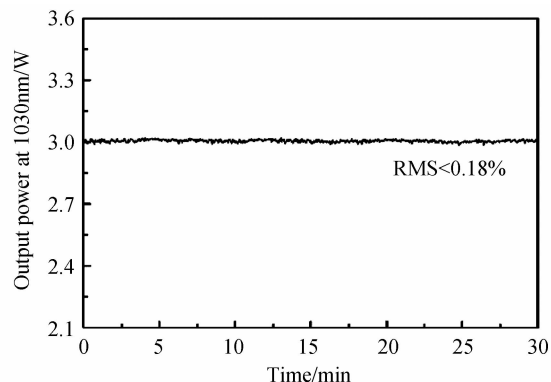


图7 1 030 nm 激光功率稳定性关系

Fig. 7 The power stability of the 1 030 nm laser

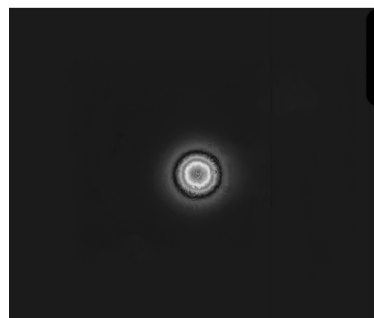


图8 1 030 nm 激光光斑分布图

Fig. 8 The beam profile of the 1 030 nm laser

4 结论

理论分析了Yb:YAG双波长激光振荡的阈值,采用10%、15%和20%的输出耦合镜,分别实现了单波长和双波长激光输出.分别采用输出耦合率为10%、20%的耦合镜,最高获得3.94 W的1 050 nm激光和3.40 W的1 030 nm激光,对应的光光转换效率为19.7%和17.0%.与理论结果相比,主要偏差是由于实际腔内的损耗、激光晶体光谱参量的偏差以及温度的影响导致的.当输出耦合率为15%、泵浦功率为11.7 W时,获得0.79 W的双波长激光,对应的光光转换效率为6.8%.当1 030 nm激光功率为3.0 W时,30 min内输出功率RMS稳定性优于0.18%.该实验结果表明控制激光晶体的温度并及时带走产生的热量可以有效地提高激光的稳定性.良好的泵浦光斑模式匹配和谐振腔设计是获得高质量激光输出的可靠保证.实验结果证实与理论分析相一致.但本实验中,1 050 nm激光过早被抑制,无法实现更高功率的双波长激光.通过连续改变输出耦合率和改进实验装置,将对进一步地提高双波长激光是有帮助的.该双波长激光器简单可靠、稳定性强,可以达到实用化的要求.

参考文献

- [1] XU J, JI Y, WANG Y, *et al.* Self-Q-switched, orthogonally polarized, dual-wavelength laser using long-lifetime Yb³⁺ crystal as both gain medium and saturable absorber[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(6): 6577-6585.
- [2] SLIPCHENKO M, MILLER J, ROY S, *et al.* 100 kHz, 100 ms, 400 J burst-mode laser with dual-wavelength diode-pumped amplifiers[J]. *Optics Letters*, 2014, **39**(6): 4735-4738.
- [3] ZHANG Yan, WANG Tian-shu, ZHANG Peng, *et al.* 2 μ m dual-wavelength tunable spacing all fiber thulium-doped fiber laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(3): 0314008.
张岩, 王天枢, 张鹏, 等. 2 μ m 波段双波长间隔可调谐光纤激光器[J]. *光子学报*, 2016, **45**(3): 0314008.
- [4] CHEN H, HUANG Y, LI B, *et al.* Efficient orthogonally polarized dual-wavelength Nd:LaMgB₅O₁₀ laser[J]. *Optics Letters*, 2015, **40**(20): 4659-4662.
- [5] HUANG Y, TZENG Y, TANG C, *et al.* Efficient high-power terahertz beating in a dual-wavelength synchronously mode-locked laser with dual gain media[J]. *Optics Letters*, 2014, **39**(6): 1477-1480.
- [6] JIANG Ke, XIE Ji-jiang, YANG Gui-long, *et al.* Two-photon absorption attenuated THz generation in GaSe[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2015, **36**(3): 361-365.
姜可, 谢冀江, 杨贵龙, 等. GaSe晶体的双光子吸收对太赫兹输出的影响[J]. *发光学报*, 2015, **36**(3): 361-365.
- [7] DENG Hu, CHEN Qi, HE Xiao-yang, *et al.* Power combining technology in three-way Terahertz photoconductive antenna[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2014, **35**(12): 1500-1505.
邓琥, 陈琦, 何晓阳, 等. 三路太赫兹光导天线的功率合成技术[J]. *发光学报*, 2014, **35**(12): 1500-1505.
- [8] ZHAI Jian-bo, HUANG Hai-bei, LI Su-mei, *et al.* Preparation and measurement of Terahertz photodetectors based on

- quantum-confined acceptor transitions[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2014, **35**(8): 986-991.
- 翟剑波, 黄海北, 李素梅, 等. 基于量子限制的受主带间跃迁太赫兹探测器的制备与测量[J]. *发光学报*, 2014, **35**(8): 986-991.
- [9] FANG He-nan, TAO Zhi-kuo. Analysis of terahertz time-domain spectroscopy by optical transfer matrix method[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2014, **35**(11): 1401-1404.
- 方贺男, 陶志阔. 基于光学传输矩阵的太赫兹时域光谱分析[J]. *发光学报*, 2014, **35**(11): 1401-1404.
- [10] GUO L, LAN R, LIU H, *et al.* 1319 nm and 1338 nm dual-wavelength operation of LD end-pumped Nd : YAG ceramic laser[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(9): 9098-9106.
- [11] YOSHIOKA H, NAKAMURA S, OGAWA T, *et al.* Dual-wavelength mode-locked Yb : YAG ceramic laser in single cavity[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(2): 1479-1486.
- [12] JI Y, CAO J, XU J, *et al.* 2.4 W highly efficient simultaneous dual-wavelength laser operation of monoclinic Yb³⁺ : Ca₄LaO(BO₃)₃ crystals[J]. *Applied Optics*, 2014, **53**(24): 5517-5521.
- [13] ZHUANG F, JUNGBLUTH B, GRONLOH B, *et al.* Dual-wavelength, continuous-wave Yb : YAG laser for high-resolution photothermal common-path interferometry[J]. *Applied Optics*, 2013, **52**(21): 5171-5177.
- [14] GANIJA M, OTTAWAY D, VEITCH P, *et al.* Cryogenic, high power, near diffraction limited, Yb : YAG slab laser [J]. *Optics Express*, 2013, **21**(6): 6973-6978.
- [15] CALMANO T, KRANKEL C, HUBER G. Laser oscillation in Yb : YAG waveguide beam-splitters with variable splitting ratio[J]. *Optics Letters*, 2015, **40**(8): 1753-1756.
- [16] PENG Y, LIM Y, CHENG J, *et al.* Near fundamental mode 1.1 kW Yb : YAG thin-disk laser[J]. *Optics Letters*, 2013, **38**(10): 1709-1711.
- [17] WANG Xu, CHENG Guang-hua, SUN Zhe. Research of LD-pumped passively Q-switched Yb : YAG thin disk laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(3): 0314009.
- 王旭, 程光华, 孙哲. LD泵浦的被动调Q Yb : YAG 薄片激光器实验研究[J]. *光子学报*, 2016, **45**(3): 0314009.
- [18] FAN T, BYER B. Diode laser-pumped solid-state lasers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1988, **24**(6): 895-912.
- [19] BEACH R. CW theory of quasi-three level end-pumped laser oscillators[J]. *Optics Communications*, 1996, **123**(1): 385-393.
- [20] TAIRA T, TULLOCH W, BYER R. Modeling of quasi-three-level lasers and operation of cw Yb : YAG lasers[J]. *Applied Optics*, 1997, **36**(9): 1867-1874.
- [21] JAFARI A, AAS M. Continuous-wave theory of Yb : YAG end-pumped thin-disk lasers[J]. *Applied Optics*, 2009, **48**(1): 106-113.