

Tm:YLF谐振泵浦Ho:YAG主动调Q多波长激光器

庞 帅, 张新陆*

天津工业大学物理科学与技术学院, 天津

收稿日期: 2023年2月21日; 录用日期: 2023年3月8日; 发布日期: 2023年3月16日

摘 要

中红外多波长固体激光器因其在不同领域的广泛应用而受到关注。本文基于此, 搭建了Tm:YLF谐振泵浦Ho:YAG主动调Q内腔式固体激光器。选用掺杂浓度为2.5%的Ho:YAG作为激光增益介质, 通过改变腔内损耗, 调控反转粒子数比率, 进而改变腔内振荡波长。研究表明, 在调制频率为4 kHz、泵浦功率为8.492 W时, 获得了最大输出功率为1.467 W, 平均脉冲宽度为50 ns, 对应的光光转化效率为17.3%, 斜效率约为21%。在连续运转模式下, 腔内仅存在单一2122.41 nm波长振荡, 而在脉冲运转模式下, 腔内振荡波长为2090 nm、2097 nm、2122 nm同步振荡。输出激光沿x方向和y方向的光束质量分别为1.64和1.65, 输出模式为基横模。

关键词

Ho:YAG, 多波长, 固体激光器

Tm:YLF Resonantly Pumped Ho:YAG Actively Q-Switched Multi-Wavelength Laser

Shuai Pang, Xinlu Zhang*

School of Physical Science and Technology, Tiangong University, Tianjin

Received: Feb. 21st, 2023; accepted: Mar. 8th, 2023; published: Mar. 16th, 2023

Abstract

Mid-infrared multi-wavelength solid-state lasers are of interest due to their wide range of applications in different fields. In this paper, a Tm:YLF resonantly pumped Ho:YAG actively Q-switched internal cavity solid-state laser is built based on this. Ho:YAG with a doping concentration of 2.5% is

*通讯作者。

chosen as the laser gain medium, and the inversion particle number ratio is modulated by changing the intracavity loss, which in turn changes the intracavity oscillation wavelength. It is shown that a maximum output power of 1.467 W with an average pulse width of 50 ns is obtained at a modulation frequency of 4 kHz and a pump power of 8.492 W, corresponding to a photo-optical conversion efficiency of 17.3% and a slope efficiency of about 21%. In continuous wave operation mode, only a single 2122.41 nm wavelength oscillation is present in the cavity, while in pulsed wave operation mode, the cavity oscillates at 2090 nm, 2097 nm and 2122 nm simultaneously. The beam quality of the output laser is 1.64 and 1.65 in the x and y directions respectively, with the output mode being fundamental transverse mode.

Keywords

HO:YAG, Mia-IR, Solid-State Laser

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

中红外多波长激光器因其在不同领域的广泛应用而引起越来越多的关注,如激光干涉测量[1],太赫兹辐射源[2],高精度远程探测[3]。因此,如何产生稳定的多波长输出成为一个重要的研究方向。2014年,Wang等人将两个涂有不同薄膜系统的法布里-珀罗(Fabry-Perot,简称:FP)滤波器作为输出镜(OutputCouple,简称:OC),通过泵浦Nd:YVO₄实现了1064 nm和1085 nm双波长输出[4]。2019年,Liu等人采用同轴泵浦双晶(Nd:YAG, b-cut Nd:YAP)的方法,成功实现了1064 nm和1079 nm激光同步输出[5]。

但是,以往的研究基本上集中在以单掺Nd³⁺晶体作为激光增益介质的1 μm波段。如陶瓷Nd:YAG [6]、Nd:YLF [7]和Nd:LuVO₄ [8]。而2 μm波段多波长固体激光器并没有获得太大的关注。作为一种常用的2 μm波段激光晶体,Ho:YAG晶体具备很多优势。首先,得益于Ho³⁺中⁵I₇和⁵I₈能级丰富的能级劈裂,我们已经在以Ho:YAG晶体作为激光增益介质的固体激光器中实现了丰富的单波长输出,如2092 nm [9],2097 nm [10],2122 nm [11]。研究发现,Ho:YAG在2090 nm和2097 nm处的受激发射截面几乎相等,分别为 $1.1543 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ 和 $0.9663 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$,而Ho:YAG在2122 nm处的受激发射截面为 $0.5392 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$,约为前两处的一半。这意味着,通过精细调节腔内损耗,可以实现双波长激光输出。Lei等人通过谐振泵浦Ho:YAG非平面环形腔,分别实现了单、双波长激光输出[12]。其次,相较于其他晶体,如Tm:Ho:YAG晶体,虽然可以使用商品化的激光二极管作为泵浦源,但其存在较大的量子损耗,降低了激光器的输出效率。相反,由于Ho:YAG晶体的吸收峰处在1.9 μm波段,我们便可以将单掺Tm³⁺激光器产生的1.9 μm波段激光作为泵浦源,通过谐振泵浦的方式泵浦Ho:YAG晶体,得到2 μm波段激光。这样做,不仅具有较低的量子损耗,约为10% [12],同时,也可以采用商品化的激光二极管作为泵浦源。此外,避免了Tm:Ho:YAG晶体中因其存在能量转移上转换过程而影响激光输出效率。

基于以上原因,本文采用自制的Tm:YLF激光器谐振泵浦Ho:YAG激光晶体,实现2 μm波段多波长脉冲激光输出。在调制频率为4 kHz,泵浦功率为在调制频率为4 kHz、泵浦功率为8.492 W时,获得最大输出功率为1.467 W,平均脉冲宽度约为50 ns,对应的光光转化效率为17.3%,斜效率约为21%。

通过扫描光谱发现, 在时域上, 多波长脉冲光是同步的。沿着 x 方向和 y 方向的光束质量分别为 1.64 和 1.65, 接近衍射极限, 输出模式为基横模。

2. Ho:YAG 增益截面分析

在实验之前, 首先利用最小二乘法拟合计算了不同波长处 Ho:YAG 的增益截面(Gain Cross Section, 简称: GSC)。GCS 与反转粒子数比率 β 的函数关系由下式给出[13]:

$$G(\lambda) = \beta\sigma_{em}(\lambda) - (1 - \beta)\sigma_{abs}(\lambda) \quad (1)$$

其中, β 代表反转粒子数比率, $\sigma_{em}(\lambda)$ 代表在波长 λ 处, 受激发射截面的值; $\sigma_{abs}(\lambda)$ 代表在波长 λ 处, 受激吸收截面的值。理论计算所用数值如下表 1 所示[9]:

Table 1. Excited absorption cross section and excited emission cross section parameters at different wavelengths
表 1. 不同波长处的受激吸收截面和受激发射截面参数

λ (nm)	$\sigma_{em}(\lambda)(\times 10^{-20} \text{ cm}^2)$	$\sigma_{abs}(\lambda)(\times 10^{-20} \text{ cm}^2)$
2090	1.1543	0.18388
2097	0.9663	0.10659
2122	0.5392	0.04727

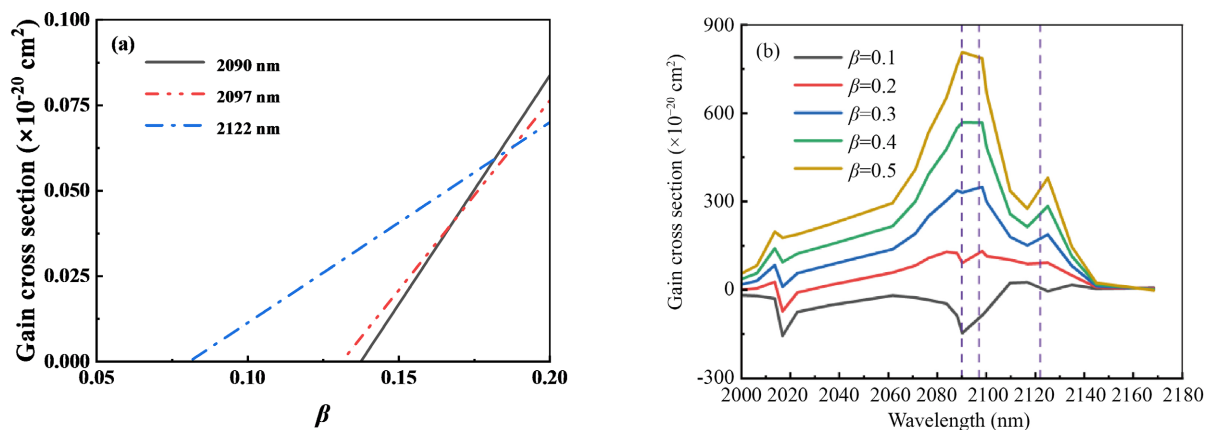


Figure 1. (a) Variation of GCS with β for a given wavelength; (b) Variation of GCS with wavelength for a given β
图 1. (a) 波长一定时, GCS 随 β 的变化关系; (b) β 一定时, GCS 随波长的变化关系

模拟结果如图 1 所示。图 1(a)代表波长一定的情况下, 增益截面 $G(\lambda)$ 随反转粒子数比率 β 的变化关系, 图 2~5(b)代表反转粒子数比率 β 一定时, $G(\lambda)$ 随波长的变化关系。从图 1(a)中可以看到, 波长一定时, $G(\lambda)$ 与 β 呈正相关。在 $\beta = 0.075$ 时, 2122 nm 率先起振。随着 β 的增加, 达到 2097 nm 起振阈值。最后, 2090 nm 开始振荡。理论分析表明, 随着 β 的增加, 也即损耗的增加, 波长逐渐发生蓝移。并且, 当 β 增大到一定程度, 曲线开始两两相交, 共得到三个交点。坐标分别为: (0.145, 0.037)、(0.154, 0.05)、(0.158, 0.052)。这意味着, 在这一点, 可以实现同步双波长输出。此外, 我们还注意到, 对于后两个交点, 它们与剩余曲线 $G(\lambda)$ 的差值小于 0.005。可以认为, 同步三波长输出也可以通过改变 β 实现。基于此, 我们可以通过改变腔内损耗, 进而选择输出波长。这一点也可以从图 1(b)看出。图中标记的三条指示线横坐标分别为: 2090 nm、2097 nm、2122 nm。当反转粒子数比率 β 一定时, $G(\lambda)$ 与 β 为非线性关系。可以看到, 当 β 较小时, 也即腔内损耗较小时, 如 $\beta = 0.1$, 此时, 位于 2090 nm 和 2097 nm 处的 $G(\lambda)$ 小于零, 故这

种情况下, 只会实现单波长 2615 nm 输出。随着腔内损耗的增大, 如 $\beta = 0.2$, 此时, 三者的 $G(\lambda)$ 大致相等, 通过精细调节腔内损耗, 可以实现三波长输出。继续增加 β 至 0.3, 可以看到此时 2122 nm 处的 $G(\lambda)$ 已经小于其余两处。因此, 在这种情况下可以实现双波长输出。但我们注意到, 此时 $G(2090)$ 要小于 $G(2097)$, 所以此时得到的应为幅值不等的双波长 (~2090 nm、~2097 nm) 输出。进一步增加损耗, 使得 $\beta = 0.4$, 此时, $G(2090)$ 与 $G(2097)$ 大致相等, 并且, $G(2122)$ 远远小于 $G(2090)$ 和 $G(2097)$ 。所以, 此时可以得到幅值相当的双波长 (~2090 nm、~2097 nm) 输出。当 $\beta = 0.5$ 时, 我们发现, $G(2090)$ 已经大于 $G(2097)$, 因此, 此时应为单波长 2090 nm 输出。

3. 实验装置

泵浦源产生的 1908 nm 激光经过焦距为 150 mm 的会聚透镜之后, 通过平面输入镜 M_1 入射到激光晶体内部, 测得晶体中心处的光斑半径约为 240 μm 。激光谐振腔腔采用平凹腔结构, 由平面输入镜 M_1 和凹平输出镜 M_2 构成, 物理腔长 $L = 162$ mm。其中, M_1 两端镀有 1.9 μm 的高透膜 ($T > 99.5\%$) 和 2.1 μm 的高反膜 ($R > 99.8\%$)。平凹镜 M_2 为基频光输出镜, 其曲率半径为 259 mm, 两端镀有 1.9 μm 的高反膜 ($R > 99.8\%$) 和对 2.1 μm 透过率为 10% 的膜系。激光晶体采用三维尺寸为 $4 \times 4 \times 30$ mm³, 掺杂浓度为 0.8 at.% 的 Ho:YAG, 并用铝箔包裹置于紫铜热沉中, 外接循环水冷装置导热, 通过热电致冷片将热沉温度控制在 288 K。声光 Q 开关由中国电子科技集团公司第 26 研究所生产, 型号为 QSGSU-5Q, 超声频率为 27 MHz, 射频驱动功率为 50 W, 调制频率可从 1 kHz 到 99 kHz 连续调谐。声光晶体材质为熔融石英, 并按照布儒斯特角切割, 其物理长度为 36 mm, 外接循环水冷装置散热。实验中, 使用带宽为 1 GHz 的示波器 (DSOS104A, Keysight) 和 InGaAs 红外探测器记录此时的单脉冲波形, 使用卓立汉光生产的型号为 Omni- λ 300 的光栅单色仪及 InGaAs 红外探测器 (PVM-10.6, VIGO) 记录输出脉冲光的光谱信息, 使用型号为 WinCamD-IR-BB (DataRay Inc.) 的光束质量分析仪测量输出光束半径, 并通过高斯拟合, 得到光束质量。

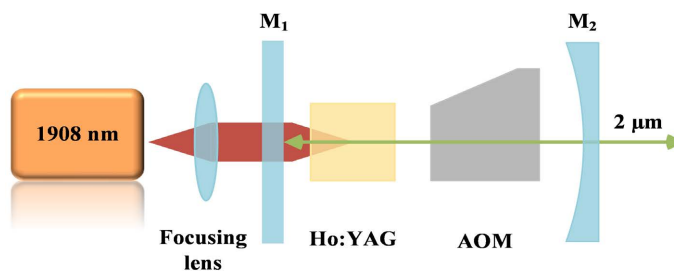


Figure 2. Schematic diagram of the Tm:YLF resonantly pumped Ho:YAG actively Q-switched internal cavity laser

图 2. Tm:YLF 谐振泵浦 Ho:YAG 主动调 Q 内腔激光器装置示意图

4. 实验结果及分析

图 3(a) 为不同调制频率下, 激光输出功率随泵浦功率的变化关系。在相同泵浦条件下, 基频腔的输出功率随着调制频率的增大而增大, 这是由于低调制频率增大了腔内损耗。实验中, 在调制频率为 4 kHz、泵浦功率为 8.492 W 时, 获得最大输出功率为 1.467 W, 对应的光光转化效率为 17.3%, 斜效率约为 21%。

图 3(b) 为不同调制频率下, 输出光的脉冲宽度随泵浦功率的变化关系。当调制频率一定时, 脉冲宽度随着泵浦功率的增加而减小。当泵浦功率相同时, 脉冲宽度随着调制频率的增大而增大。这是由于在高调制频率下, 激光上能级无法在 Q 开关关断期间积累足够多的粒子, 当 Q 开关打开时, 腔内 Q 值瞬时

突变, 只能输出脉冲宽度较宽、峰值功率较低的脉冲光。实验中, 在调制频率为 4 kHz、泵浦功率为 8.492 W 时, 获得的平均脉冲宽度约为 50 ns。同时我们注意到, 不论在哪个调制频率下, 脉冲宽度最后都趋于一个极限值。这是由于当谐振腔结构确定之后, 脉冲宽度仅是超阈度的单值函数。随着超阈度的增加, 脉冲宽度会呈现出先急剧下降后趋于稳定的变化趋势。因此, 当泵浦功率增加到一定程度后, 脉冲宽度不会继续随着功率的增加而继续减小, 而是趋于一个稳定值。

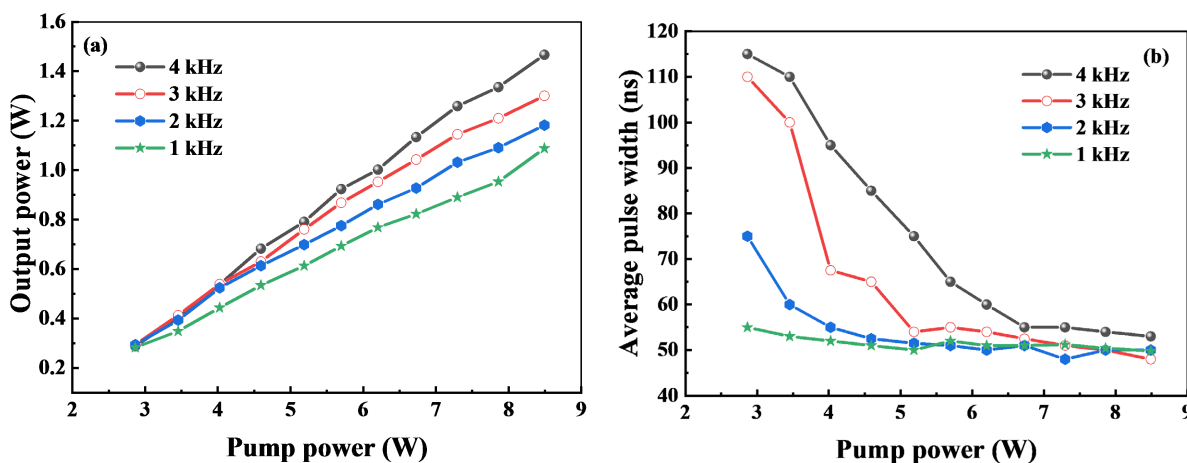


Figure 3. Variation of (a) output power and (b) pulse width, with pumping power, at different modulation frequencies
图 3. (a) 输出功率和(b) 脉冲宽度, 在不同调制频率下, 随泵浦功率的变化关系

如图 4 所示, 在泵浦功率为 8.492 W 且腔内未加入声光调制器件时, 使用波长计扫描输出光谱。结果显示, 此时腔内为 2122.41 nm 的单波长振荡。

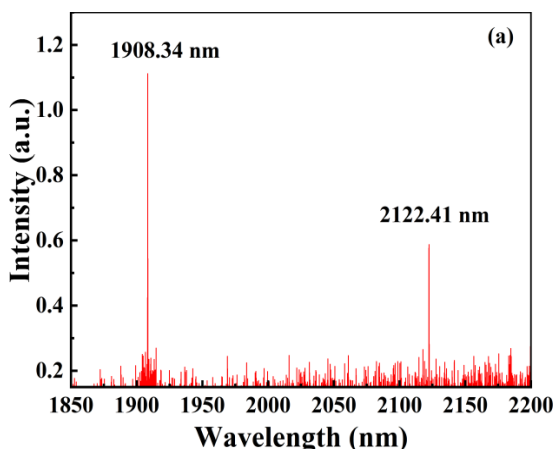


Figure 4. Spectrum of continuous wave
图 4. 连续光光谱

接着在腔内加入声光调制器件, 打开声光 Q 开关。在不同调制频率、不同功率条件下扫描得到了脉冲光谱, 如图 5 所示。可以看到, 相较于连续模式下, 谐振腔内为单波长 2122.41 nm 振荡, 在脉冲模式下, 由于调制器件的加入, 使得腔内损耗增大, 相应地, 导致反转粒子数比率 β 也变大, 从而使得腔内振荡波长由单一波长振荡变为 2090 nm、2098 nm、2123 nm 三波长同步振荡。同时, 对比(a)和(b), 我们

还发现, 当调制频率一致时, 腔内振荡波长并未发生明显变化。也就意味着, 泵浦功率对于振荡波长的影响较小。

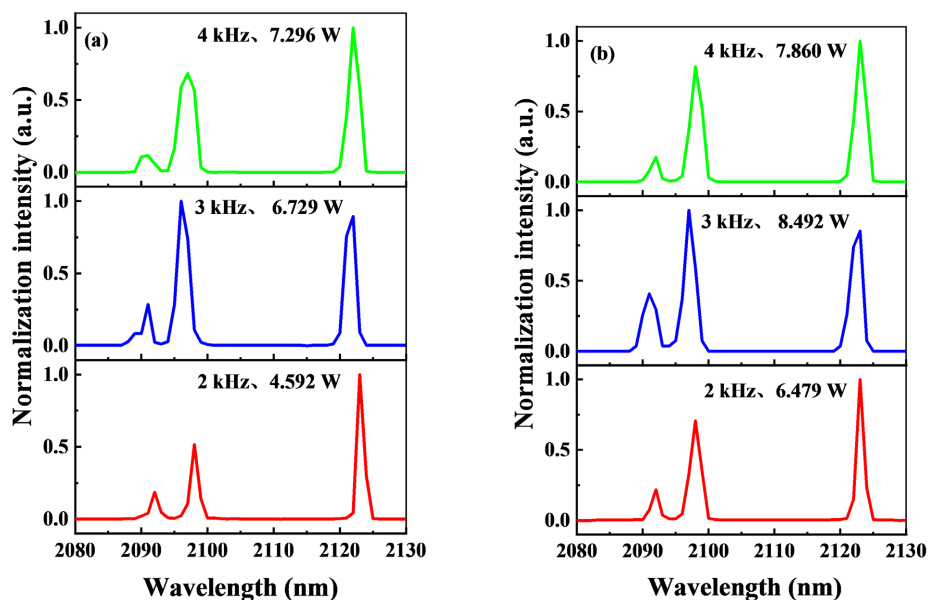


Figure 5. Spectra at different modulation frequencies and different pump power

图 5. 不同调制频率, 不同泵浦功率下的光谱

图 6(a)为在调制频率为 4 kHz、泵浦功率为 8.492 W 时, 扫描得到的脉冲轮廓, 此时的脉冲宽度约为 42 ns, 这可能是由于脉冲序列抖动而造成的, 并且还可以看到, 虽然此时腔内为三波长振荡, 但只探测到一个脉冲波形, 说明实验中得到的多波长输出在时域上是同步的。图 6(b)则为脉冲序列图, 从图中可以看到, 脉冲的不稳定性在 $\pm 10\%$ 以内, 脉冲序列较为平稳。

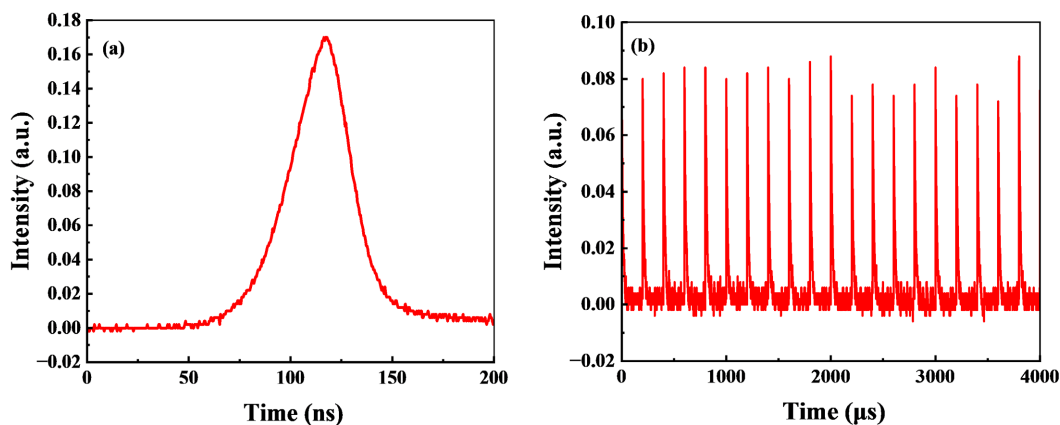


Figure 6. (a) Pulse profile; (b) Pulse sequences

图 6. (a) 脉冲轮廓; (b) 脉冲序列

图 7 是在调制频率为 4 kHz、泵浦功率为 8.492 W 时, 测量得到的光束质量。插图为光场二维能量分布图。可以看到, 输出光的光束质量沿 x 方向和 y 方向分别为 1.64 和 1.65, 且二维能量分布近似为圆形, 由此可以判断, 输出激光以基横模传输。

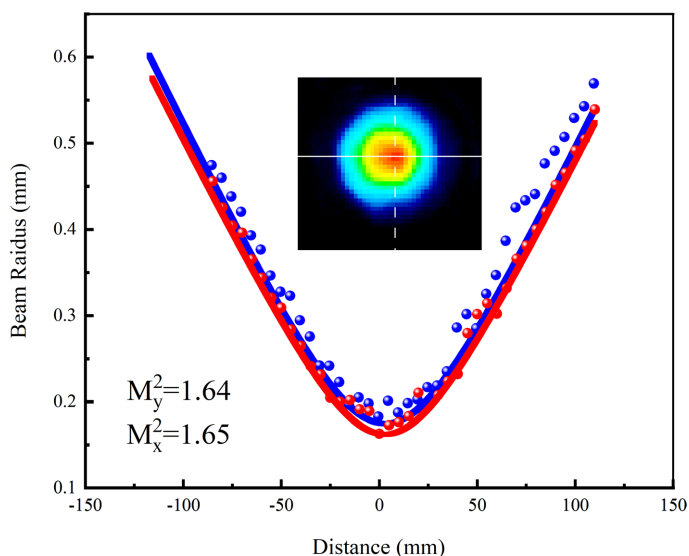


Figure 7. Beam quality Illustration: Two-dimensional energy distribution of the light field

图 7. 光束质量。插图：光场二维能量分布

5. 结论

首先, 基于对 Ho:YAG 晶体不同波长处增益截面的计算, 从理论上证明多波长输出的可能性。之后, 搭建了 Tm:YAP 谐振泵浦 Ho:YAG 主动调 Q 内腔式激光器进行实验。实验中, 在调制频率为 4 kHz、泵浦功率为 8.492 W 时, 获得了最大输出功率为 1.467 W, 平均脉冲宽度约为 50 ns, 对应的光光转化效率为 17.3%, 斜效率为 21%。并且, 通过改变腔内损耗, 实现了腔内振荡波长由单一 2122 nm 过渡到多波长(2090 nm, 2098 nm, 2123 nm)同步输出。

参考文献

- [1] Fei, L. and Zhang, S. (2007) The Discovery of Nanometer Fringes in Laser Self-Mixing Interference. *Optics Communications*, **273**, 226-230. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2006.12.022>
- [2] Tanoto, H., Teng, J.H., Wu, Q.Y., Sun, M., Chen, Z.N., Maier, S.A., *et al.* (2012) Greatly Enhanced Continuous-Wave Terahertz Emission by Nano-Electrodes in a Photoconductive Photomixer. *Nature Photonics*, **6**, 121-126. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2011.322>
- [3] Ye, J., Tian, Z., Hu, Y., Wei, H., Li, Y., Zhao, Y., *et al.* (2021) Dual-Wavelength Wide Area Illumination Raman Difference Spectroscopy for Remote Detection of Chemicals. *Applied Optics*, **60**, 3540-3548. <https://doi.org/10.1364/AO.422321>
- [4] Wang, X.-Z., Wang, Z.-F., Bu, Y.-K., Liu, Z., Chen, L.-J., Cai, G.-X., *et al.* (2014) A 1064 nm, 1085 nm Dual-Wavelength Nd:YVO₄ Laser Using Fabry-Perot Filters as Output Couplers. *IEEE Photonics Technology Letters*, **26**, 1983-1985. <https://doi.org/10.1109/LPT.2014.2344114>
- [5] Liu, Y., Sheng, Q., Zhong, K., Shi, W., Ding, X., Qiao, H., *et al.* (2019) Dual-Wavelength Intracavity Raman Laser Driven by a Coaxially Pumped Dual-Crystal Fundamental Laser. *Optics Express*, **27**, 27797-27806. <https://doi.org/10.1364/OE.27.027797>
- [6] Wang, Z., Liu, H., Wang, J., Lv, Y., Sang, Y., Lan, R., *et al.* (2009) Passively Q-Switched Dual-Wavelength Laser Output of LD-End-Pumped Ceramic Nd:YAG Laser. *Optics Express*, **17**, 12076-12081. <https://doi.org/10.1364/OE.17.012076>
- [7] Lin, Z., Wang, Y., Xu, B., Cheng, Y., Xu, H. and Cai, Z. (2015) Simultaneous Dual-Wavelength Lasing at 1047 and 1053 nm and Wavelength Tuning to 1072 nm in a Diode-Pumped a Cut Nd:LiYF₄ Laser. *Optical Engineering*, **54**, 126114. <https://doi.org/10.1117/1.OE.54.12.126114>

-
- [8] Huang, Y.P., Cho, C.Y., Huang, Y.J. and Chen, Y.F. (2012) Orthogonally Polarized Dual-Wavelength Nd:LuVO₄ Laser at 1086 nm and 1089 nm. *Optics Express*, **20**, 5644-5651. <https://doi.org/10.1364/OE.20.005644>
- [9] Zhao, T., Wang, F. and Shen, D.Y. (2015) High-Power Ho:YAG Laser Wing-Pumped by a Tm:Fiber Laser at 1933 nm. *Applied Optics*, **54**, 1594-1597. <https://doi.org/10.1364/AO.54.001594>
- [10] Chen, H., Shen, D., Zhang, J., Yang, H., Tang, D., Zhao, T., *et al.* (2011) In-Band Pumped Highly Efficient Ho:YAG Ceramic Laser with 21 W Output Power at 2097 nm. *Optics Letter*, **36**, 1575-1577. <https://doi.org/10.1364/OL.36.001575>
- [11] Wang, L., Gao, C., Gao, M. and Li, Y. (2013) Resonantly Pumped Monolithic Nonplanar Ho:YAG Ring Laser with High-Power Single-Frequency Laser Output at 2122 nm. *Optics Express*, **21**, 9541-9546. <https://doi.org/10.1364/OE.21.009541>
- [12] Wang, L., Gao, C., Gao, M., Li, Y., Yue, F. and Liu, L. (2013) Single-Frequency and Dual-Wavelength Ho:YAG Nonplanar Ring Oscillator Resonantly Pumped by a Tm:YLF Laser. *Optical Engineering*, **53**, 061603. <https://doi.org/10.1117/1.OE.53.6.061603>
- [13] Ohta, K., Saito, H. and Obara, M. (1993) Spectroscopic Characterization of Tm³⁺:YVO₄ Crystal as an Efficient Diode Pumped Laser Source near 2000 nm. *Journal of Applied Physics*, **73**, 3149-3152. <https://doi.org/10.1063/1.353005>