

DOI:10.16136/j.joel.2022.09.0863

组合增益介质双波长激光器的功率均衡机制研究

张寒琦, 胡淼*, 许蒙蒙, 金益文, 周雪芳, 李齐良

(杭州电子科技大学 通信工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘要:研究了激光二极管端面抽运的组合增益介质双波长激光器的功率调谐特性。研究表明,组合增益介质的内部抽运光束腰位置和温度是影响双波长信号相对功率比的重要因素;当固定抽运光束腰位置,增益介质发射截面随温度的变化率不同,导致双波长信号相对功率随温度而改变。进行了相关的验证实验,对于特定参数的组合增益介质双波长激光器,固定抽运功率为3 W,固定抽运光束腰位置在增益介质内1.5 mm,当热沉温度从5℃升温至32.3℃,输出双波长信号达到功率均衡,总输出功率为435 mW,实验结果与理论仿真符合较好。

关键词:二极管端面抽运;组合增益介质;双波长激光器;功率均衡

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2022)09-00897-07

Research on power balance mechanism of dual-wavelength laser with combined gain medium

ZHANG Hanqi, HU Miao*, XU Mengmeng, JIN Yiwen, ZHOU Xuefang, LI Qiliang

(College of Communication Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China)

Abstract: The power tuning characteristics of laser diode end pumping dual-wavelength laser with combined gain medium are studied. The results show that the waist position of pump beam in combined gain medium and the temperature of gain medium are important factors affecting the relative power ratio of the dual-wavelength signals. When the pump beam waist position is fixed, the different change rate of the emission cross section of gain medium will cause the relative power of the dual-wavelength signal to change with temperature. The experiments show, for the combined gain medium dual-wavelength laser with specific parameters, when the pump power is 3 W, and the pump beam waist position is 1.5 mm in the gain medium, the heat sink temperature rises from 5℃ to 32.3℃, the output dual-wavelength signal achieves power balance, and the total output power is 435 mW. The experimental results are in good agreement with the theoretical simulation.

Key words: diode end pumping; combined gain medium; dual-wavelength laser; power balance

1 引言

双波长激光器广泛应用于各种领域,如光学射频^[1]、激光测距^[2]、多普勒激光雷达^[3,4]、光生毫米波/太赫兹波^[5-7]等。在双波长信号外差拍频^[8]过程中,信号的相对功率比会影响外差拍频效率^[9],因此探究双波长信号的功率均衡机制较有意义。掺钕钒酸盐组合增益介质由于吸收系数

高,受激发射截面大^[10],其双波长激光器被广泛研究。如2014年,HUANG等^[11]实验研究了Nd:YVO₄/Nd:GdVO₄双波长激光器,通过纵向移动抽运光束腰位置,使输出1064 nm和1063 nm的双波长信号功率比值($P_{1064\text{ nm}}/P_{1063\text{ nm}}$)在10—0.15的区间内变化,功率均衡时,当抽运功率为14 W,总输出功率达1.3 W。2017年,LIU等^[12]用a-cut和c-cut Nd:YLF晶体作为组合增益介

* E-mail: miao_hu@foxmail.com

收稿日期:2021-12-21 修订日期:2022-01-30

基金项目:国家自然科学基金(61705055)、2020年度浙江省重点研发计划项目(2020C01106)和浙江省属高校基本科研业务费专项资金(GK209907299001-018)资助项目

质,通过调整抽运光束腰位置,获得输出功率比可调的双波长信号。功率均衡状态下,当抽运功率为 10 W,输出总功率为 2.92 W,波长为 1047 nm 和 1053 nm 的信号功率分别为 1.50 W 和 1.42 W。2018 年,LIANG 等^[13]设定抽运功率为 7 W,在 Nd:YVO₄/Nd:GdVO₄ 组合增益介质内垂直轴线方向移动抽运光束腰位置控制双波长信号的功率比值,在调谐过程中 $P_{1064\text{ nm}}$ 从 0.50 W 升至 0.80 W, $P_{1063\text{ nm}}$ 从 0.84 W 降至 0.45 W。综上所述,过去组合增益介质双波长激光器输出相对功率的调谐,主要是通过移动抽运光束腰位置实现,然而在实验操作过程中,仅移动抽运光束腰位置实现功率均衡,较难控制调谐精度。在此基础上金涛和夏梦莹等人提出了温控功率调谐^[14,15],如 2018 年,金涛等^[14]设定抽运功率为 5.4 W,发现 Nd:YVO₄/Nd:GdVO₄ 双波长激光器输出短长波功率比与温度呈负相关,控制组合增益介质热沉温度 5—40 °C,1063 nm 输出功率线性下降了 65.66%,1064 nm 输出功率线性下降了 29.05%;2020 年,夏梦莹等^[15]实验发现在 Nd:YVO₄/Nd:GdVO₄ 双波长激光器中,提高抽运功率需要降低热沉温度,使输出双波长信号实现功率再均衡,其温度与抽运功率的比率为 -11.23 °C/W。

论文理论研究了结合移动束腰位置和温控两种调谐方式的功率均衡机制,并进行实验验证。理论上分析了组合增益介质双波长激光器的功率调谐特性,研究了组合增益介质内不同抽运光束腰位置与增益介质发射截面的温度依赖性,对输出双波长信号相对功率的影响。实验搭建了 Nd:YVO₄/Nd:GdVO₄ 双波长激光器,先改变抽运光束腰位置粗调功率均衡,然后在固定抽运光束腰位置的基础上,通过温控装置控制增益介质的热沉温度精调功率均衡,最终实现功率均衡输出。论文最后给出了相应的结论。

$$\eta_{p,i} = \frac{w_i^2 [\alpha_i \int_{i-1}^{l_{i-1}+l_i} (1 - \exp(-2 \frac{w_{p,i}^2}{w_i^2})) \frac{\exp(-\alpha_i(z-l_{i-1}))}{w_{p,i}^2} dz]^2}{(1 - \exp(-\alpha_i l_i)) \alpha_i \int_{i-1}^{l_{i-1}+l_i} (1 - \exp(-4 \frac{w_{p,i}^2}{w_i^2})) \frac{\exp(-\alpha_i(z-l_{i-1}))}{w_{p,i}^2} dz}, \quad (5)$$

$$w_{p,i} = w_{p0} \sqrt{1 + (\frac{M^2 \lambda_p (z-z_0)}{n_i \pi w_{p0}^2})^2}, \quad (6)$$

式中, w_i 为振荡光的光斑半径, α_i 为增益介质对特定波长抽运光的吸收系数, $w_{p,i}$ 为抽运光的光斑半径, w_{p0} 为抽运光束腰位置在组合增益介质内 Z_0 处的束腰半径, $Z_0 = 0$ 为 GM1 前端面, M^2 为抽运光的光束质量因子, n_i 为增益介质的折射率。

拟采用 Nd:YVO₄/Nd:GdVO₄ 双波长激光器方

2 理论分析和仿真

2.1 纵向移动组合增益介质内抽运光束腰位置调谐功率

拟采用的组合增益介质由两种不同的增益介质前后胶合/键合而成。定义靠近抽运源的增益介质 (gain medium, GM) 为前端增益介质 (GM1), 远离抽运源的则为后端增益介质 (GM2)。抽运光束腰位置可在组合增益介质内沿轴线方向纵向平移。输入镜可选择直接在 GM1 前端面镀膜, 输出镜为部分反射镜。根据四能级激光器理论模型和相关速率方程分析, 组合增益介质双波长激光器的抽运阈值功率 $P_{th,i}$, 斜率效率 $S_{e,i}$ 和输出对应波长信号的功率 $P_{out,i}$ 表达式如下^[16,17]。

$$P_{th,i} = \frac{\ln(\frac{1}{R_{oc,i}}) + \delta_i}{2l_i \eta_{q,i}} I_{sat,i} \frac{\lambda_i}{\lambda_p} V_{eff,i}, \quad (1)$$

$$S_{e,i} = \frac{\ln(\frac{1}{R_{oc,i}})}{\ln(\frac{1}{R_{oc,i}}) + \delta_i} \eta_{q,i} \frac{\lambda_p}{\lambda_i} \eta_{o,i}, \quad (2)$$

$$P_{out,i} = S_{e,i} (P_{in,i} - P_{th,i}), \quad (3)$$

式中, 下标 $i(1,2)$ 为不同增益介质, $R_{oc,i}$ 为输出镜的反射率, δ_i 为谐振腔耗散性损耗, $\ln(1/R_{oc,i})$ 为输出镜的透射损耗, l_i 为增益介质的长度, $\eta_{q,i}$ 为量子效率, $I_{sat,i}$ 为增益介质饱和光强, $I_{sat,i} = hv/\sigma_i \tau_i$, hv 为获得激光的光子能量, σ_i 为增益介质的受激发射截面, τ_i 为增益介质的荧光寿命, λ_p 为抽运光的波长, λ_i 为输出激光信号的波长, $P_{in,i}$ 为输入增益介质的抽运光功率, $V_{eff,i}$ 为有效模体积函数, $\eta_{o,i}$ 为重叠效率。

$$V_{eff,i} = \frac{\alpha_i \int_{l_{i-1}}^{l_{i-1}+l_i} (1 - \exp(-2 \frac{w_{p,i}^2}{w_i^2})) \frac{\exp(-\alpha_i(z-l_{i-1}))}{w_{p,i}^2} dz}{l_i \pi (1 - \exp(-\alpha_i l_i))} \quad (4)$$

案对上述公式进行仿真, 设定抽运功率为 3 W, 抽运光波长 $\lambda_p = 808\text{ nm}$, 抽运光的光束质量因子 $M^2 = 200$, GM1 为 Nd:YVO₄, GM2 为 Nd:GdVO₄, 增益介质内抽运光束腰半径 $w_{p0} = 120\text{ }\mu\text{m}$, $l_0 = 0\text{ mm}$, GM1 长度 $l_1 = 1\text{ mm}$, GM2 长度 $l_2 = 5\text{ mm}$, GM1 吸收系数 $\alpha_1 = 0.71\text{ mm}^{-1}$, GM2 吸收系数 $\alpha_2 = 7.40\text{ mm}^{-1}$, $P_{in,1} = 1.53\text{ W}$, $P_{in,2} = 1.47\text{ W}$, GM1 折射率 $n_1 = 2.22$, 受激发射截面 $\sigma_1 = 25 \times 10^{-19}\text{ cm}^2$, 荧光寿

命 $\tau_1 = 100 \mu\text{s}$, GM2 折射率 $n_2 = 2.25$, 受激发射截面 $\sigma_2 = 7.6 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$, 荧光寿命 $\tau_2 = 95 \mu\text{s}$, 量子效率 $\eta_{a,i} = 1$, 谐振腔损耗性损耗 $\delta_i = 0.003$, 输出镜反射率 $R_{oc,i} = 0.9$, 输出激光信号波长 $\lambda_1 = 1064 \text{ nm}$, $\lambda_2 = 1063 \text{ nm}$ 。

仿真结果如图1所示, 输出波长为 1064 nm 和 1063 nm 信号的功率 $P_{1064 \text{ nm}}$ 、 $P_{1063 \text{ nm}}$ 随增益介质内抽运光束腰位置发生变化。移动抽运光束腰位置 Z_0 从 0.2 mm 至 2.0 mm 的过程中, $P_{1064 \text{ nm}}$ 从 0.61 W 降至 0.21 W , $P_{1063 \text{ nm}}$ 先从 0.35 W 增至 0.58 W , 再降至 0.38 W 。当 $Z_0 = 0.9 \text{ mm}$, 输出两种波长信号的功率一致, 均为 0.57 W 。文献[18]理论仿真也得到在激光二极管(laser diode, LD)端面抽运的组合增益介质双波长激光器中, 组合不同激光晶体, 调节束腰位置进行增益控制, 可灵活调节输出两种波长信号的相对功率比, 且当移动至晶体胶合面附近实现功率均衡。

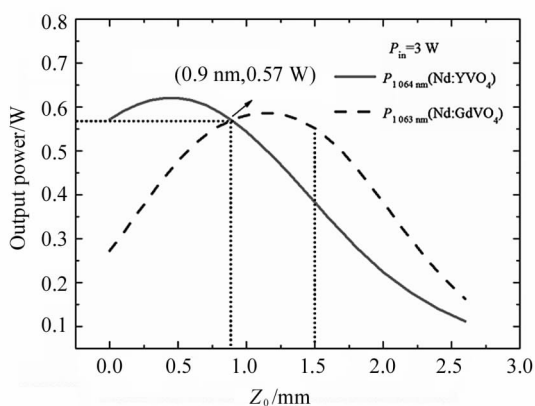


图1 抽运功率为 3 W , $P_{1064 \text{ nm}}$ 、 $P_{1063 \text{ nm}}$ 和抽运光束腰位置关系的理论仿真结果

Fig. 1 Theoretical results of the output powers for 1064 and 1063 nm as a function of the waist position of the pump beam for the case of $P_{in} = 3 \text{ W}$

2.2 控制组合增益介质温度调谐功率

已知增益介质的温度变化会导致其发射截面变化^[19], 进而影响激光器的阈值功率和输出功率。增益介质可以通过热沉控制温度, 考虑在不同的热沉温度, 组合增益介质中各晶体的中心温度与热沉温度的差值基本保持恒定^[20], 给出基于热沉温度依赖的 Fuchtbauer-Ladenburg 式^[21]:

$$\sigma(\lambda, T_c) = \frac{(\bar{\lambda})^4}{8\pi cn(T_c)^2 \tau_{\text{rad}}(T_c)} \frac{I(\lambda, T_c)}{\int I(\lambda, T_c) d\lambda}, \quad (7)$$

式中, T_c 为热沉温度, $\sigma(\lambda, T_c)$ 为随 T_c 变化的发射截面谱, $\bar{\lambda}$ 为平均发射波长, $I(\lambda, T_c)$ 为随 T_c 变化的荧

光谱, $\tau_{\text{rad}}(T_c)$ 为随 T_c 变化的荧光寿命, $n(T_c)$ 为随 T_c 变化的折射率。在一定温度范围内, 增益介质的折射率和荧光寿命随温度变化对发射截面造成的影响可忽略不计, 因此仿真时视为常量。由式(7)得增益介质的发射截面随热沉温度的变化只与其对应温度下荧光谱的变化有关。某温度下增益介质的发射截面 $\sigma(\lambda, T_c)$ 可利用实验测得该温度下荧光谱 $I(\lambda, T_c)$ 计算得到。

将式(1)和(3)结合式(7)得到组合增益介质双波长激光器输出功率相对变化量和热沉温度的关系表达式^[19]:

$$P_{\text{out},i}(T_c) = (P_{\text{in},i}/P_{\text{th},i}(T_{c0}) - \sigma_i(T_{c0})/\sigma_i(T_c)) \times P_{\text{out},i}(T_{c0}) / (P_{\text{in},i}/P_{\text{th},i}(T_{c0}) - 1), \quad (8)$$

式中, T_c 的单位为 $^{\circ}\text{C}$, T_{c0} 为 $T_c = T_0$ $^{\circ}\text{C}$, $P_{\text{out},i}(T_c)$ 为增益介质随 T_c 变化的输出对应波长信号的功率, $\sigma_i(T_c)$ 为增益介质随 T_c 变化的发射截面大小, $P_{\text{th},i}(T_c)$ 为激光器随 T_c 变化的阈值功率。增益介质的发射截面大小与热沉温度一般有准线性关系^[22], 即 $\sigma_i(T_{c0})/\sigma_i(T_c) = 1/(1 - k_i(T_c - T_{c0}))$, 式中 k_i 为增益介质的发射截面大小与热沉温度的拟合系数。文献[22]中实验测量计算得到 Nd:GdVO₄ 和 Nd:YVO₄ 晶体发射截面谱归一化峰值发射截面大小与热沉温度线性拟合的结果, Nd:YVO₄/Nd:GdVO₄ 组合增益介质的拟合系数值 $k_1 = 0.00319$, $k_2 = 0.00268$ 。不同拟合系数 k_i 对应激光器温控功率调谐结果和抽运功率与阈值功率比 $R_{\text{in}/\text{th},i} = P_{\text{in},i}/P_{\text{th},i}(T_{c0})$ 的关系如图2所示。

由图2得到, 在拟合系数 k_i 相同的情况下, 抽运功率 $P_{\text{in},i}$ 相对于激光器的阈值功率 $P_{\text{th},i}$ 比值 $R_{\text{in}/\text{th},i}$ 越小, 晶体发射截面大小随温度变化对输出功率相对变化的影响越大; 在抽运功率与阈值功率比值 $R_{\text{in}/\text{th},i}$ 相同的情况下, 拟合系数 k_i 越大, 即晶体发射截面大小随热沉温度变化越大, 导致输出对应波长信号的功率变化越明显。低抽运功率下, 一方面激光器输出功率随温度变化较明显, 另一方面增益介质内部温度低, 热沉积小, 更有利于输出信号通过温控调谐达到功率均衡状态。组合增益介质中不同晶体的 k_i 值和 $P_{\text{th},i}(T_{c0})$ 值不同, 晶体发射截面大小随温度的变化以及其对输出功率相对变化的影响程度均不同。

拟采用的组合增益介质中 Nd:YVO₄ 晶体和 Nd:GdVO₄ 晶体的厚度分别为 1 mm 和 5 mm , 由仿真结果图1得到, 抽运光束腰位置在 Nd:YVO₄/Nd:GdVO₄ 组合增益介质内 1.5 mm , 即 $Z_0 = 1.5 \text{ mm}$,

输出双波长信号的相对功率比 $P_{1064\text{ nm}}/P_{1063\text{ nm}}=0.7$ 。抽运光束腰位置一旦固定,两者 $P_{\text{th},i}(T_{\text{c}0})$ 值的相对关系会随之确定,仿真得到该位置下 $P_{\text{th},1}(T_{\text{c}0})/P_{\text{th},2}(T_{\text{c}0})$ 值为 0.8。根据仿真得到的相对关系量,近似取值 $R_{\text{in/th},1}=1.5, R_{\text{in/th},2}=1.2$ 。在该情况下,输出双波长信号的温控功率调谐结果如图 3 所示。

图 3 表明,固定 Nd:YVO₄/Nd:GdVO₄ 组合增益介质内抽运光束腰位置 $Z_0=1.5\text{ mm}$, T_c 从 0 °C 均匀升温至 50 °C 过程中, Nd:YVO₄、Nd:GdVO₄ 晶体输出对应波长信号的功率逐渐降低, $P_{1064\text{ nm}}、P_{1063\text{ nm}}$ 的变化量近似为 $-0.76\%/^{\circ}\text{C}$ 和 $-1.53\%/^{\circ}\text{C}$, 且 $P_{1064\text{ nm}}、P_{1063\text{ nm}}$ 在热沉温度为 31 °C 时相同。

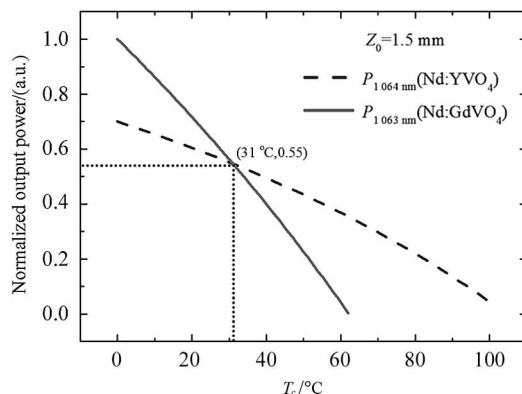


图 3 $Z_0=1.5\text{ mm}$, $P_{1064\text{ nm}}$ 、 $P_{1063\text{ nm}}$ 和热沉温度关系的理论仿真结果

Fig. 3 Theoretical results of the output powers for 1064 and 1063 nm as a function of the heat sink temperature for the case of $Z_0=1.5\text{ mm}$

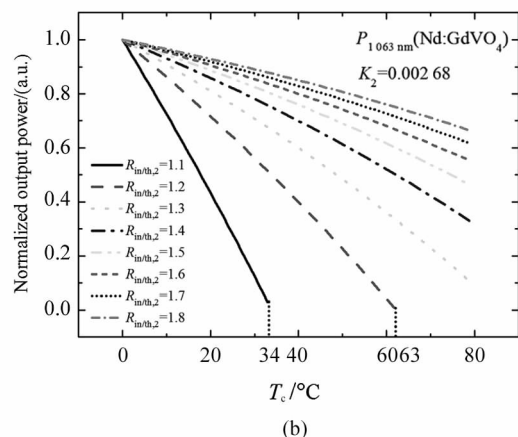
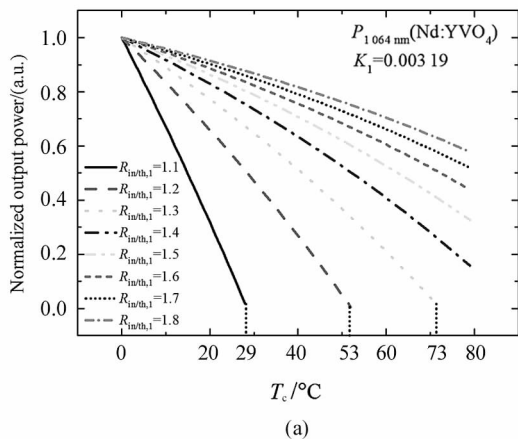


图 2 不同拟合系数的晶体对应激光器温控功率调谐仿真结果:(a) 拟合系数 k_1 ; (b) 拟合系数 k_2

Fig. 2 Simulation results of power tuning of crystal corresponding lasers with different fitting coefficients by controlling temperature:(a) Fitting coefficient k_1 ; (b) Fitting coefficient k_2

理论分析和仿真表明,组合增益介质双波长激光器输出两种波长信号的功率值及其随温度的变化率不同,两者理论上可通过调节温度来达到一致,即输出双波长信号达到功率均衡状态。特定参数的 Nd:YVO₄/Nd:GdVO₄ 双波长激光器,在抽运功率为 3 W,抽运光束腰位置在增益介质内 1.5 mm 的情况下,温控装置的热沉温度从 0 °C 均匀升温至 31 °C,输出双波长信号达到功率均衡,此时两者功率均为 0.30 W。

3 实验验证

实验装置示意图如图 4 所示,采用中心波长为 808 nm,尾纤芯径为 400 μm 的 LD 为抽运源,抽运光通过光纤耦合激光准直器和非球面透镜聚焦到组合增益介质内,非球面透镜固定在推进器装置的镜架上,通过旋转推进器装置底部旋钮(螺距为 0.5 mm)控制镜架水平移动,实现抽运光束腰位置沿组合增益介质轴线方向平移。组合增益介质由掺杂浓度为 0.5 at. % 的 a-cut Nd:YVO₄ 晶体和掺杂浓度为 1.0 at. % 的 a-cut Nd:GdVO₄ 晶体胶合而成,两晶体光轴均垂直放置,其尺寸为 3 mm×3 mm×(1+5) mm。Nd:YVO₄ 晶体前端面镀有 808 nm 的增透膜(antireflection, AR)和 1064 nm 的全反射膜(high reflection, HR)作为输入镜, Nd:GdVO₄ 晶体后端面镀有 1064 nm 的 AR,其结合部位两端面均镀有 1064 nm 和 808 nm 的 AR。输出镜 M2 镀有 1064 nm 的高反射膜($R=90\%$)和 808 nm 的 HR。输出激光信号进行分束,输入到光功率计(Power

meter, PM10X)和分辨率为 0.02 nm 的光谱分析仪 (optical spectrum analyzer, OSA, AQ6370B, 日本横河电机株式会社)进行测量。

组合增益介质外部包裹 0.1 mm 厚的钢膜,被稳定夹持在嵌有热敏电阻的热沉中,且周围填充液态金属,实现完全热接触,达到较好的温度控制效果。

温控装置主要由半导体制冷片、温度控制器单元(连接电脑端操控)和水冷机(特域 CW-3000)等构成,整套装置实现温度调节范围为 0—100 ℃,调节精度达 0.1 ℃。组合增益介质的温度分布为各晶体光轴处温度最高,靠近热沉处温度最低,且靠近 LD 抽运源的 Nd:YVO₄ 晶体的内部温度高于同一轴线的

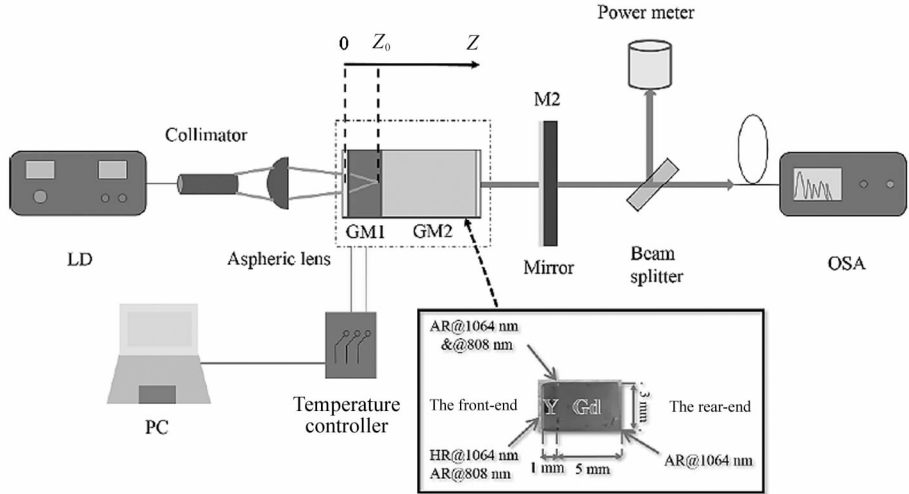


图 4 LD 端面抽运的组合增益介质双波长激光器装置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of combined gain medium dual-wavelength laser device based on LD end pumping

Nd:GdVO₄ 晶体。

实验时将抽运功率调至 3 W,设置热沉温度 T_c 为 5 ℃,调整抽运光束腰位置 Z_0 的起始点于距离组合增益介质前端面 0.5 mm 处,每次旋转推进器装置底部旋钮半圈推进。在连续模式下,输出功率与抽运光束腰位置的关系如图 5 所示。当抽运光束腰位置 Z_0 从 0.5 mm 增大至 2.0 mm 时,输出波长为 1 064 nm 信号的功率降低,1 063 nm 信号的功率先增大后减小,当 Z_0 处于 0.75—1.0 mm 区间内,两种波长的功率较为接近,实验结果和理论仿真结果比较吻合。但在实验中发现抽运光束腰位置的调整精度较难控制,也不能达到较好的功率均衡状态,因此实验在固定抽运光束腰位置的基础上,通过温控装置进行温控功率调谐,使其进一步达到功率均衡。

抽运功率保持 3 W 不变,固定 Nd:YVO₄/Nd:GdVO₄ 组合增益介质内抽运光束腰位置于距离 Nd:YVO₄ 晶体前端面 1.5 mm 处,以 5 ℃为间隔记录热沉温度 T_c 在 5—40 ℃范围内的相关数据。Nd:YVO₄/Nd:GdVO₄ 晶体输出对应波长信号的功率比率近似由其光谱峰值强度的比率确定。在连续模式下,Nd:YVO₄/Nd:GdVO₄ 双波长激光器温控功率调谐的实验结果如图 6 所示。各晶体输出对应波长

信号的功率随热沉温度 T_c 的变化如图 6(a)所示。

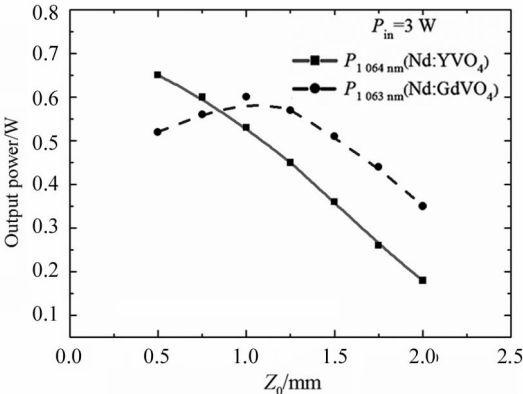


图 5 抽运功率为 3 W, $P_{1064\text{ nm}}$ 、 $P_{1063\text{ nm}}$ 和抽运光束腰位置关系的实验结果

Fig. 5 Experimental results of the output powers for 1 064 and 1 063 nm as a function of the waist position of the pump beam for the case of $P_{in} = 3\text{ W}$

由图 6(a)可得,热沉温度 T_c 从 5 ℃均匀升高至 40 ℃的过程中,Nd:YVO₄ 和 Nd:GdVO₄ 晶体输出对应波长信号的功率逐渐降低,变化率近似为 $-0.83\%/^{\circ}\text{C}$ 和 $-1.88\%/^{\circ}\text{C}$ 。相比于理论模拟结果的 $-0.76\%/^{\circ}\text{C}$ 和 $-1.53\%/^{\circ}\text{C}$,实验结果的变化率更大,其主要原因是存在热透镜效应,增益介质温度

升高,不仅使其发射截面减小,其产生的热透镜效应将进一步使输出功率降低^[23]。现定义功率均衡度 R_p , 其是输出双波长信号相对功率比的参数,该值越接近于1,说明功率均衡度越高。图6(b)为功率均衡度 R_p 随热沉温度 T_c 的变化图,由图得升高热沉温度 T_c , 功率均衡度 R_p 呈准线性下降趋势。线性拟合各功率均衡度 R_p , 得该情况下的功率均衡点位于 32.28°C , 考虑到温控装置的精度为 0.1°C , 将热沉温度 T_c 调至 32.3°C , 此时总输出功率测量值为 435 mW 。实验结果的功率均衡温度值和仿真结果不完全一致的原因是仿真得到输出各波长信号的功率变化率偏小,实验时抽运光束腰位置不能精确调至预设的距离点处。

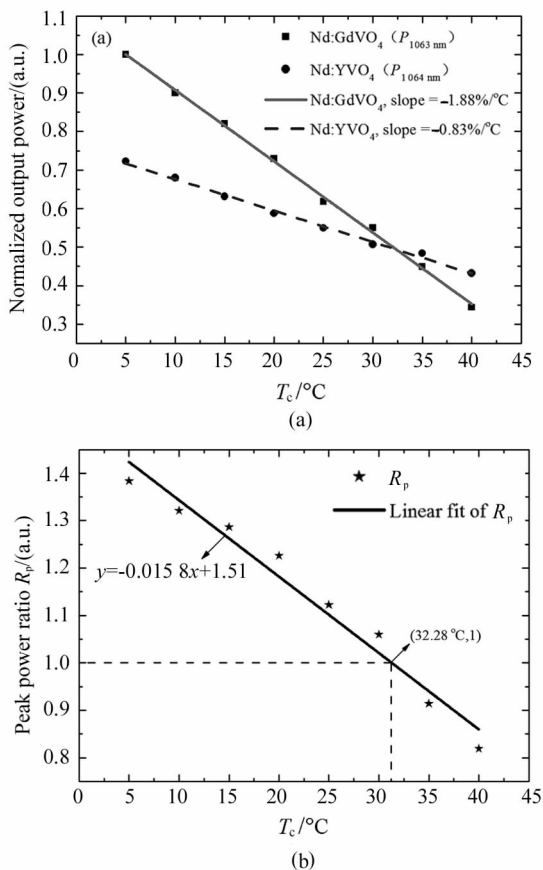


图6 Nd:YVO₄/Nd:GdVO₄ 双波长激光器温控功率调谐实验结果:(a) 各晶体输出对应波长信号的功率相对变化量随热沉温度 T_c 的变化;(b) 功率均衡度 R_p 随热沉温度 T_c 的变化

Fig. 6 Experimental results of power tuning of Nd:YVO₄/Nd:GdVO₄ dual-wavelength laser with temperature controlling: (a) The relative power variation of the corresponding wavelength signal output by each crystal varying with the heat sink temperature T_c ; (b) R_p varying with T_c

4 结 论

在组合增益介质双波长激光器中,增益介质内的抽运光束腰位置会影响输出双波长信号的相对功率比。在固定束腰位置的基础上,改变组合增益介质的热沉温度,能够相对精确地调谐输出双波长信号的相对功率,达到功率均衡状态。实验设置抽运功率为 3 W , 抽运光束腰位置于 Nd:YVO₄/Nd:GdVO₄ 组合增益介质内 1.5 mm , 热沉温度从 5°C 升至 32.3°C , 输出信号达功率均衡,测得总输出功率为 435 mW 。组合增益介质双波长激光器的功率均衡机制研究具有广泛的应用前景,能为高效利用外差拍频获得太赫兹波提供理想的方案。

参考文献:

- [1] DANION G, HAMEL C, FREIN L, et al. Dual frequency laser with two continuously and widely tunable frequencies for optical referencing of GHz to THz beatnotes[J]. Optics Express, 2014, 22(15): 17673-8.
 - [2] CRIADO A R, ACEDO P, CARPINTERO G, et al. Observation of phase noise reduction in photonically synthesized sub-THz signals using a passively mode-locked laser diode and highly selective optical filtering[J]. Optics Express, 2012, 20(2): 1253-1260.
 - [3] ZHENG Z, ZHAO C M, ZHANG H Y, et al. Phase noise reduction by using dual-frequency laser in coherent detection[J]. Optics & Laser Technology, 2016, 80: 169-175.
 - [4] CHEN J B, ZHU H B, XIA W, et al. Self-mixing birefringent dual-frequency laser Doppler velocimeter[J]. Optics Express, 2017, 25(2): 560-572.
 - [5] HUANG Y J, TZENG Y S, TANG C Y, 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] CHO C Y, HUANG T L, WEN S M, et al. Nd: YLF laser at cryogenic temperature with orthogonally polarized simultaneous emission at $1\,047\text{ nm}$ and $1\,053\text{ nm}$ [J]. Optics Express, 2014, 22(21): 25318-25323.
 - [7] YE P P, ZHU S Q, ZHEN L, et al. Passively Q-switched dual-wavelength green laser with an Yb: YAG/Cr³⁺: YAG/YAG composite crystal[J]. Optics Express, 2017, 25(5): 5179.
 - [8] LI X, HU M, LI P, et al. A dual-wavelength laser based on the Nd: YVO₄/Nd: YLF combined crystal[J]. Journal of Optoelectronics & Laser, 2019, 30(5): 468-473.
- 李祥, 胡森, 李鹏, 等. 基于 Nd:YVO₄/Nd:YLF 组合晶体的双波长激光器研究[J]. 光电子·激光, 2019, 30(5):

- 468-473.
- [9] CHEN X, DENG Z, YAO J. Photonic generation of microwave signal using a dual-wavelength single-longitudinal-mode fiber ring laser[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2006, 54(2): 804-809.
- [10] YU H, LIU J, ZHANG H, et al. Advances in vanadate laser crystals at a lasing wavelength of 1 micrometer[J]. Laser & Photonics Reviews, 2015, 8(6): 847-864.
- [11] HUANG Y J, TZENG Y S, TANG C Y, 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.
- [12] LIU Y, ZHONG K, MEI J, et al. Compact and stable high-repetition-rate terahertz generation based on an efficient coaxially pumped dual-wavelength laser[J]. Optics Express, 2017, 25(25): 31988-31996.
- [13] LIANG H C, HUANG T L, CHANG F L, et al. Flexibly controlling the power ratio of dual-wavelength SESAM-based mode-locked lasers with wedged-bonded Nd: YVO₄/Nd: GdVO₄ crystals[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2018, 24(5): 1-5.
- [14] JIN T, HU M, LI P, et al. Experimental study of the dual-frequency laser based on the Nd: YVO₄/Nd: GdVO₄ combined crystal[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(9): 091407.
金涛, 胡森, 李鹏, 等. Nd: YVO₄/Nd: GdVO₄ 组合晶体双频激光器实验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(9): 091407.
- [15] XIA M Y, HU M, ZHOU H M, et al. Experimental research on power-balanced Nd: YVO₄/Nd: GdVO₄ dual-wavelength laser[J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(4): 0414003.
夏梦莹, 胡森, 周慧敏, 等. Nd: YVO₄/Nd: GdVO₄ 双波长激光器的功率均衡实验研究[J]. 光子学报, 2020, 49(4): 0414003.
- [16] FAN T Y, BYER R L. Diode laser-pumped solid-state lasers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1988, 24(6): 895-912.
- [17] LAPORTA P, BRUSSARD M. Design criteria for mode size optimization in diode-pumped solid-state lasers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1991, 27(10): 2319-2326.
- [18] LIU Y, ZHONG K, MEI J, et al. Compact and flexible dual-wavelength laser generation in coaxial diode-end-pumped configuration[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(1): 1-10.
- [19] WANG X B, XU X J, LU Q S. Effect of thermally induced change of stimulated emission cross section in heat capacity lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(1): 43.
汪晓波, 许晓军, 陆启生. 热容激光器中热致受激发射截面改变对输出功率的影响[J]. 中国激光, 2009, 36(1): 43.
- [20] HAN N. Research on frequency difference tuning characteristics of Nd: YVO₄/Nd: GdVO₄ combined crystal dual wavelength laser[D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2019.
韩宁. Nd: YVO₄/Nd: GdVO₄ 组合晶体双波长激光器的频差调谐特性研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2019.
- [21] DONG J, SHIRAKAWA A, UEDA K I. Numerical simulation of a diode-laser-pumped self-Q-switched Cr, Yb: YAG microchip laser[J]. Optical Review, 2005, 12(3): 170-178.
- [22] CAI M L, HU M, DAI R, et al. Experimental study of emission cross section spectra and microchip laser spectra of Nd: GdVO₄ and Nd: YVO₄ crystals[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(11): 1101004.
蔡美伶, 胡森, 戴荣, 等. Nd: GdVO₄ 和 Nd: YVO₄ 晶体发射截面谱及微片激光器光谱的实验研究[J]. 中国激光, 2017, 44(11): 1101004.
- [23] WANG H. Influence of the thermal effect on the output performance of diode pumped solid state laser[D]. Xi'an: Xidian University, 2010.
王慧. 热效应对二极管泵浦激光器输出性能的影响[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.

作者简介:

胡森 (1982—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事固体激光器以及激光雷达方面的研究.