

DOI: 10.3788/JQO20172303.0011 <sup>(2)</sup>

## 双 10 瓦级相位关联单频连续波 1 064/532 nm 双波长激光器

石柱<sup>1,2</sup>, 郭永瑞<sup>1,2</sup>, 尹祺巍<sup>1,2</sup>, 苏静<sup>1,2</sup>, 卢华东<sup>1,2†</sup>

(1. 山西大学光电研究所 量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西 太原 030006;

2. 山西大学 极端光学协同创新中心, 山西 太原 030006)

**摘要:** 本文采用包含有非线性晶体的四镜 8 字环形谐振腔结构, 通过选取输出耦合镜的透射率和分析铽镱石榴石(TGG)晶体热透镜效应的影响, 实现了输出功率达双 10 瓦级具有相位关联特性的单频连续波 1 064/532 nm 双波长激光器。实验中通过采用透射率为 4% 的输出耦合镜和长度为 20 mm 的三硼酸锂(LBO)晶体, 实现了输出功率分别为 11.30 W 和 11.23 W 的 1 064/532 nm 双波长激光输出, 线宽分别为 165 kHz 和 330 kHz, 对应的长期功率稳定性在 3 小时内分别优于  $\pm 0.68\%$  和  $\pm 0.56\%$ , 光束质量因子  $M^2$  均小于 1.1。该种具有相位关联特性的双波长激光器可以用来制备稳定的双色光阱和泵浦多个光学参量(OPO)实现多组份纠缠态光场的产生。

**关键词:** 端面泵浦; 腔内倍频; 环形谐振腔; 单频; 全固态激光器

**中图分类号:** O431

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1007-6654(2017)03-0290-07

### 0 引言

全固态连续单频激光器由于具有低噪声、窄线宽、高光束质量、高相干度等优点, 已经在量子网络通信<sup>[1-2]</sup>、冷原子物理<sup>[3]</sup>和引力波探测<sup>[4]</sup>等领域得到广泛应用。2014 年, 我们组在提出激光器实现单频运转的物理条件的基础上, 通过优化谐振腔内的线性和非线性损耗, 获得了输出功率达 33.7 W 的连续单频 1 064 nm 激光器<sup>[5]</sup>。2016 年, 我们组通过在谐振腔内插入具有负热光系数的磷酸二氘钾(DKDP)晶体, 实现了对铽镱石榴石(TGG)晶体的热透镜效应的动态补偿, 进而利用单个谐振腔实现了 30.2 W 的单频 532 nm 激光输出<sup>[6,7]</sup>。而随着基础研究的深入和科学技术的发展, 人们开始对具有相位关联特性的基频光

和倍频光的输出功率达 10 瓦级的双波长激光器产生了兴趣<sup>[8-10]</sup>。这是因为利用该类具有相位关联特性的输出功率均达双 10 瓦级的 1 064/532 nm 连续单频双波长激光器, 在无需锁定的条件下, 利用单次穿过的和频过程可以实现单频 355 nm 紫光输出<sup>[11]</sup>。在冷原子物理的研究中, 利用该类具有相位关联特性的高功率双波长激光器可以实现稳定的(红失谐和蓝失谐)双色光阱的制备, 进而为光学超晶格结构的建立提供了保障, 而光学超晶格结构可以为量子计算和量子模拟的演示提供优越的平台<sup>[12-14]</sup>。在量子通信中, 利用该类具有相位关联特性的双波长激光器可以同时泵浦多个光学参量(OPO)从而实现多组份纠缠态光场的产生, 进而为量子计算和量子网络通信

<sup>(2)</sup> 收稿日期: 2017-04-19; 修回日期: 2017-05-25

基金项目: 国家自然科学基金(61405107; 61227902); 科技部重大科学研究计划(2016YFA0301401)

作者简介: 石柱(1963-), 男, 山西文水人, 实验师。

†通信作者: 卢华东, E-mail: luhuadong@sxu.edu.cn

的研究提供了重要的技术基础<sup>[15-17]</sup>。

为了满足不同领域对相位关联的双 10 瓦级单频连续波双波长激光器的需求,我们研究组对该类激光器进行了研究。通过分析输出耦合镜透射率与泵浦功率和非线性转化因子之间的相互关系以及输出耦合镜的透射率对 TGG 晶体的热效应的影响,在实验中采用了透射率为 4% ( $T_{1064\text{ nm}} = 4\%$ ) 的输出耦合镜,利用单个谐振腔实现了具有相位关联特性的输出功率达双 10 瓦级的 1 064/532 nm 连续波单频双波长激光输出。

## 1 实验装置

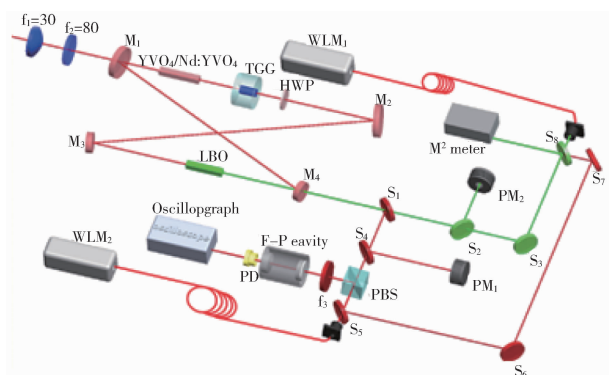


Fig. 1 The experimental setup.  $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6, S_7, S_8$ : beam splitter;  $f_1, f_2$ : coupling lens;  $f_3$ : lens; HWP: half-wave plate; PD: photodiode detector;  $WLM_1, WLM_2$ : wavelength meter.

图 1 实验装置图  $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6, S_7, S_8, S_9$ : 分束镜;  $f_1, f_2$ : 耦合镜;  $f_3$ : 聚焦透镜; HWP: 半波片; PD: 光电二极管;  $WLM_1, WLM_2$ : 波长计。

相位关联的双 10 W 级单频连续波 1064 / 532 nm 激光器实验装置如图 1 所示。泵浦源为 LIMO 公司提供的光纤耦合输出的激光二极管,中心波长为 888 nm,光纤芯径和数值孔径分别为 400  $\mu\text{m}$  和 0.22,最大输出功率为 80 W。激光二极管输出的泵浦光经由焦距分别为  $f_1 = 30$  mm 和  $f_2 = 80$  mm 的两个平凸透镜组成的望远镜耦合系统聚焦到增益晶体中实现泵浦光和激光器谐振腔模之间的最佳模式匹配。单频连续波 1 064/532 nm 激光器采用了四镜 8 字环形谐振腔结构,其中  $M_1$  和  $M_2$  为曲率半径  $R = 1\ 500$  mm 的平凸

镜,输入镜  $M_1$  镀有 888 nm 高透膜 ( $T_{888\text{ nm}} > 99.5\%$ ) 和 1 064 nm 高反膜 ( $R_{1064\text{ nm}} > 99.7\%$ )。  $M_2$  和  $M_3$  镀有 1 064 nm 高反膜 ( $R_{1064\text{ nm}} > 99.7\%$ )。  $M_3$  和  $M_4$  均为曲率半径  $R = 100$  mm 的平凹镜。输出镜  $M_4$  在 1 064 nm 波段的透射率为  $t$ ,且对 532 nm 波段镀有高透膜 ( $T_{532\text{ nm}} > 95\%$ )。实验中需要对输出耦合镜的透射率  $t$  进行细致的选取,从而实现高功率双波长激光输出。增益晶体为 a 轴切割的复合  $\text{YVO}_4 + \text{Nd:YVO}_4$  晶体,其尺寸为 3 mm  $\times$  3 mm  $\times$  (3 + 20) mm,前段 3 mm 的非掺杂  $\text{YVO}_4$  基质用来减缓增益晶体的端面热效应,后段 20 mm 的 Nd:  $\text{YVO}_4$  的掺杂浓度为 0.8%,增益晶体的前端面镀有 888/1 064 nm 减反膜 ( $R_{1064\text{ nm}; 888\text{ nm}} < 0.25\%$ ),后端面镀有 1 064 nm 减反膜 ( $R_{1064\text{ nm}} < 0.25\%$ ),增益晶体的激光损伤阈值为 50  $\text{GW}/\text{cm}^2$ 。增益晶体的后端面有 1.5° 的楔角,通过增大  $\sigma$  偏振光的几何损耗,从而保证了具有较大发射截面积的  $\pi$  偏振光优先于  $\sigma$  偏振光在腔内起振,最终保证激光器能够实现稳定的线偏振激光输出。谐振腔内插入的光学单向器由 TGG 晶体和  $\lambda/2$  波片组成,保证激光器的单向运转。为了实现基频光部分转化为倍频光,我们在谐振腔内插入 3 mm  $\times$  3 mm  $\times$  20 mm 的 I 类非临界相位匹配的 LBO 晶体作为倍频晶体,其较宽的温度接收带宽和较高的激光损伤阈值 (LBO 晶体的激光损伤阈值为 18.9  $\text{GW}/\text{cm}^2$ ) 等优良特性完全满足本实验的需求<sup>[8]</sup>。LBO 晶体的双端面镀有对 1 064/532 nm 双减反膜,安装在紫铜控温炉内并放置在  $M_3$  和  $M_4$  之间的基模束腰处,并且用自制的精度为 0.01°C 的温控仪对其进行控温。激光器的输出光束经分束镜 ( $S_1$ ) 后分为基频光和倍频光两部分,分别注入功率计  $\text{PM}_1$  和  $\text{PM}_2$  (LabMax-Top, Coherent) 中,测量其输出功率。

## 2 理论分析

在谐振腔内引入非线性损耗同时通过优化谐振腔中输出耦合镜透射率,可实现具有相位关联特性的高功率单频连续波双波长激光器的制备<sup>[19-22]</sup>。这是因为腔内二次谐波产生和输出耦

合镜透射率均会引起谐振腔基频光的功率损耗,进而改变激光器的运转特性<sup>[23,24]</sup>。内腔倍频双波长激光器中基频光( $P_f$ )和倍频光( $P_{sh}$ )的输出功率可以表示为:

$$P_f = tAI \quad (1)$$

$$P_{sh} = \eta AI^2 \quad (2)$$

其中,  $t$  为输出耦合镜的透射率,  $A$  为激光光束在增益晶体中的平均横截面积,  $I$  为腔内基频光的功率密度,  $\eta$  为非线性转化因子。

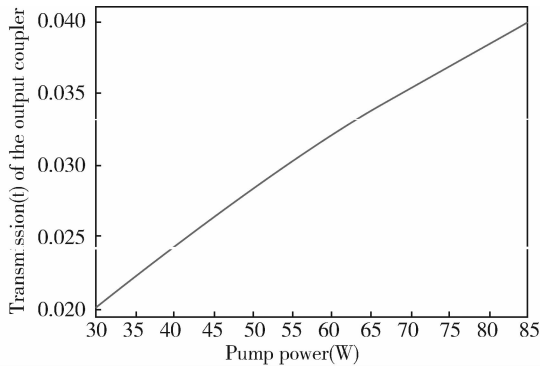


Fig. 2 Output coupler transmission( $t$ ) versus the pump power  $P_m$  for high output power laser.

图 2 输出耦合镜透射率随泵浦功率的变化

要想获得等功率的具有相位关联特性的双波长激光器,则有:

$$P_f = P_{sh} \quad (3)$$

结合公式(1)–(3),并且根据文献[23,24],输出耦合镜的透射率  $t$  可以表示为:

$$t = \frac{\sqrt{(L + 2\eta I_0)^2 - 8\eta I_0(L - KP_m)} - (L + 2\eta I_0)}{4} \quad (4)$$

其中,  $L$  为腔内的线性损耗,  $I_0$  为腔内基频光的饱和功率密度,  $K$  为泵浦因子,  $P_m$  为泵浦功率。公式(4)中,当非线性晶体的材料和长度都已确定,并且其温度处于最佳相位匹配温度时,非线性晶体的非线性转化因子为确定值<sup>[23]</sup>。当增益晶体和倍频晶体处的光束束腰半径分别为  $400 \mu\text{m}$  和  $60 \mu\text{m}$  时,可以计算得到的非线性转化系数为  $1.06 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{W}$ 。通过将激光器的参数( $L = 4.8\%$ ,  $K = 6.91\% \text{ W}^{-1}$ ,  $I_0 = 8.30827 \times 10^6 \text{ W/m}^2$ ,  $A = 1 \text{ mm}^2$ )代入公式(4),可求解出输出耦合镜的透射率  $t$  与泵浦功率  $P_m$  之间的变化关系,如

图 2 所示。从图 2 中可以看出,在非线性转化因子一定的情况下,随着泵浦功率的增大,输出耦合镜的透射率也必须相应增大,才能保证基频光和倍频光的输出功率相当。当注入谐振腔的泵浦功率为  $74 \text{ W}$  左右时,对应的具有相位关联特性的等功率双波长激光器的输出耦合镜的透射率应该在  $3.7\%$  左右进行选择。

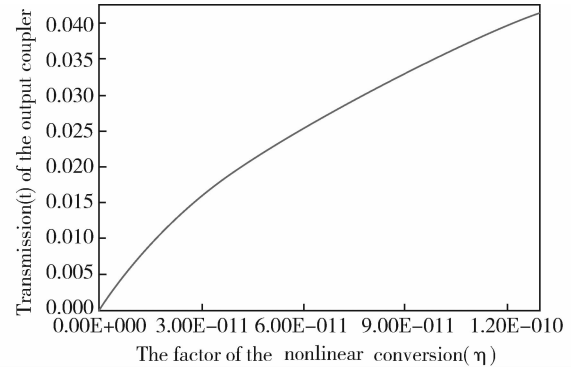


Fig. 3 Output coupler transmission  $t$  versus the factor of the nonlinear conversion .

图 3 输出耦合镜透射率  $t$  随非线性转化因子的变化

同时,当泵浦功率一定时,利用公式(4)我们也可以分析输出耦合镜的透射率  $t$  与非线性转化因子之间的关系,如图 3 所示。同样,在泵浦功率一定的条件下,输出耦合镜的透射率随着非线性转化因子的增大而增大。当所选取的非线性晶体的温度处于最佳相位匹配温度时,我们可以确定输出耦合镜的透射率。

另外,激光器在高功率泵浦条件下,除了增益晶体具有严重的热透镜效应外,组成光学单向器的 TGG 晶体对基频光的吸收同样会产生严重的热透镜效应<sup>[6]</sup>,其将会和增益晶体的热透镜效应一起影响着激光器的输出功率和运转稳定性。然而,在实验中我们发现,通过增大输出耦合镜的透射率,可有效减缓 TGG 晶体的热透镜效应,进而减缓其对激光器运转效率和稳定性的影响。TGG 晶体的热透镜焦距可以表示为:

$$f = \frac{K_c \omega_T^2}{\gamma \omega^2 I \frac{dn}{dt}} \frac{1}{1 - \exp(1 - \alpha l)} \quad (5)$$

其中,  $K_c$  为 TGG 晶体的热传导系数,  $\frac{dn}{dt}$  为 TGG

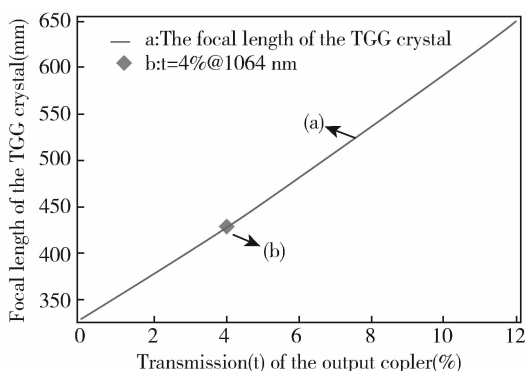


Fig. 4 Thermal focal length of the TGG crystal versus the output coupler transmission.

图 4 TGG 晶体的热透镜焦距随输出耦合镜的透射率的变化。

晶体的热光系数,  $\gamma$  为 TGG 晶体的热转化系数,  $\omega$  和  $\omega_T$  为基频光在增益晶体和 TGG 晶体处的束腰半径,  $\alpha$  为 TGG 晶体对腔内基频光的吸收系数,  $l$  为 TGG 晶体的长度。

依据文献[6]可知,  $\frac{\omega_T}{\omega}$  的比值近似为 1, 通过将激光器的参数和 TGG 晶体的参数 ( $K_c = 7.4 \text{ Wm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,  $\frac{dn}{dt} = 20 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ,  $\alpha = 0.003 \text{ cm}^{-1}$ ,  $l = 8 \text{ mm}$ ,  $\gamma = 1$ ) 代入公式(5)可以清楚地看到输出耦合镜的透射率对 TGG 晶体热效应的影响, 如图 4 所示。从图 4 中可以清楚地看出, 当输出耦合镜的透射率由 0~12% 变化时, TGG 晶体的热透镜焦距由 300 mm 变化为 651 mm。也就是说, 增加输出耦合镜的透射率, 可有效减缓 TGG 晶体的热透镜效应。当我们选取输出耦合镜的透射率为 4% 时, TGG 晶体的热透镜焦距为 427 mm。

### 3 实验过程及结果分析

基于以上分析, 实验中选取输出耦合镜的透射率为 4% ( $T_{1064\text{nm}} = 4\%$ ;  $T_{532\text{nm}} > 95\%$ ), 非线性晶体 LBO 的长度为 20 mm。当非线性晶体的温度处于最佳相位匹配温度 149.0°C 时, 记录了 1 064(a) / 532 nm(b) 激光器的输出功率随泵浦功率的变化趋势, 由图 5 可以看出该双波长激光器的泵浦阈值为 30 W, 在注入泵浦功率为 74 W 时, 实现了 11.30 W 和 11.23 W 的 1 064/532

nm 双波长激光输出, 对应的总的光-光转换效率为 30.44%。实验中, 激光器的纵模结构由精细度为 120, 自由光谱区为 750 MHz 的 F-P 干涉仪进行监视, 用示波器记录 F-P 干涉仪透射曲线, 从图 6 可以看出该激光器处于稳定的单频运转状态, 这受益于通过选取输出耦合镜的透射率和非线性晶体的长度对腔内的线性损耗和非线性损耗进行优化的结果<sup>[25]</sup>。进一步地, 我们在实验中用线宽为 60 kHz 的高精细度 F-P 干涉仪测试双波长单频激光器的线宽, 测试得到双波长激光器在 532 nm 波段的光谱线宽为 330 kHz, 对应的 1 064 nm 激光器输出光束的光谱线宽为 165 kHz。图 7 为用波长计 WLM<sub>1</sub> 和 WLM<sub>2</sub> 同时对 1 064/532 nm 激光器在 1 分钟内的频率漂移监测的结果, 由图中可以清晰地看

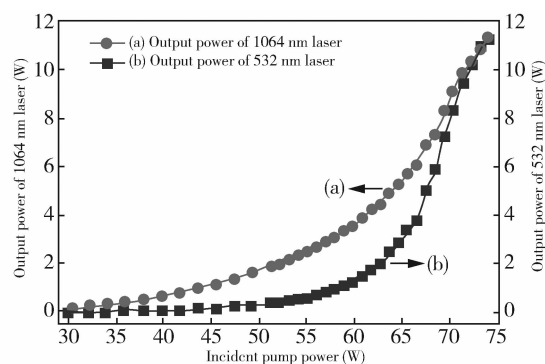


Fig. 5 Output powers of 1064/532 nm phase correlated dual-wavelength laser versus the incident pump power.

图 5 相位关联双波长激光器的输出功率随泵浦功率的变化

出, 内腔倍频激光器中倍频光的频率随基频光频率的变化而变化, 倍频光与基频光的频率之间存在实时的自我适应特征, 图中 1 064 (a) / 532 nm (b) 激光器自动同步的频率漂移特性说明了内腔倍频双波长激光器的倍频光和基频光之间存在严格相位关联特性。图 8 为实验中测试得到的双波长激光器在 3 h 内的长期功率稳定性, 1 064 (a) / 532 nm (b) 激光器的输出功率的波动性在 3 h 内分别小于  $\pm 0.68\%$  和  $\pm 0.56\%$ 。实验中, 我们用光束质量分析仪测量了具有相位关联的特性的双波长激光器的光束质量, 图 9 中 1 064 nm (a) 激光器在 X 方向和 Y 方向上的  $M^2$  因子分别为

1.06和1.10,532 nm (b) 激光器在 X 方向和 Y 方向上的  $M^2$  因子分别为 1.03 和 1.08,其对应的散焦曲线以及光场分布分别对应于图 9 中 1 064 nm (a) 和 532 nm (b)。

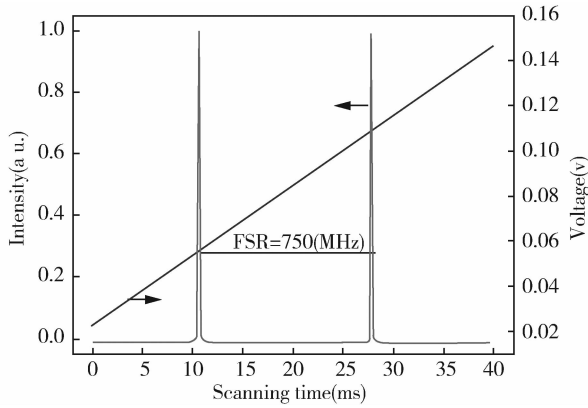


Fig. 6 Measured longitudinal-mode structure of the phase correlated dual-wavelength laser  
图 6 相位关联双波长激光器的单频特性

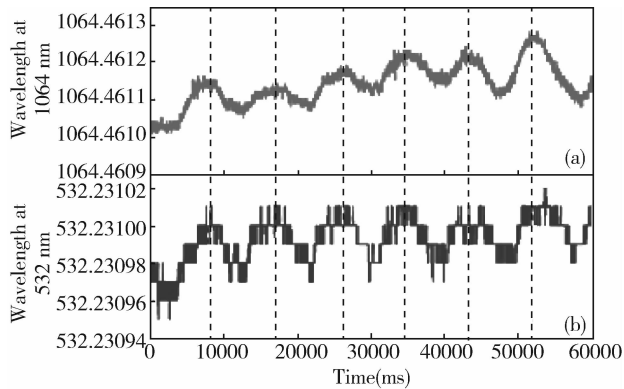


Fig. 7 The frequency drifts of 1064 (a) and 532 nm (b) phase correlated dual-wavelength laser in 1 minute.  
图 7 1064 (a) /532 nm (b) 相位关联双波长激光器 1 min 内的频率漂移

#### 4 结论

为了实现输出功率达双 10 瓦级的具有相位关联特性的连续单频双波长激光器,实验中定量分析了输出耦合镜透射率与泵浦功率和非线性转化因子之间的相互关系,并且分析了输出耦合镜的透射率对 TGG 晶体的热效应的影响。实验中通过使用透射率为 4% ( $T_{1064nm}=4\%$ ) 的输出耦合镜并结合调谐长度 20 mm 的 LBO 非线性晶体的温度为最佳相位匹配温度,实现了谐振腔内的线性损耗和非线性损

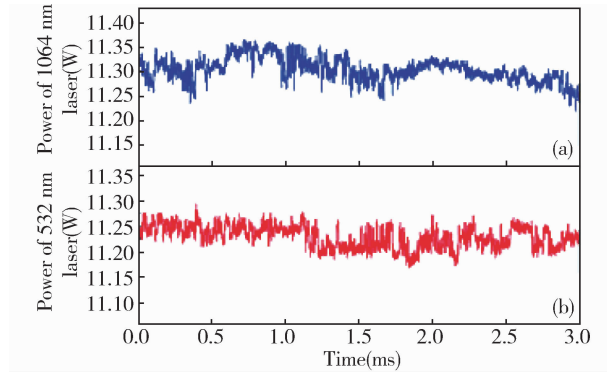


Fig. 8 Long term power stabilities of 1064 (a) and 32 nm (b) phase correlated dual-wavelength laser for 3 h  
图 8 1 064 (a) /532 nm (b) 相位关联双波长激光器 3h 内的功率稳定性

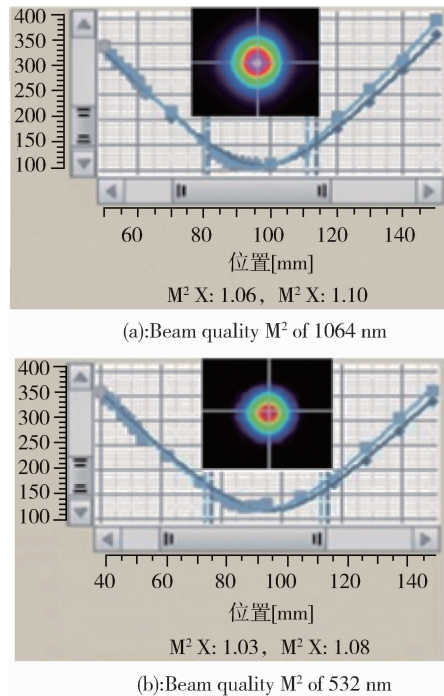


图 9 1 064 (a) /532 nm (b) 相位关联双波长激光器的光束质量测量结果

9 Measured results of the beam quality of 1064 (a) and 532 nm (b) phase correlated dual-wavelength laser.

耗之间的优化,进而实现了稳定性良好,具有相位关联特性,输出功率分别为 11.30 W 和 11.23 W 的 1 064/532 nm 双波长单频连续波激光器,测量得到双波长激光器的光谱线宽分别为 165 kHz 和 330 kHz。该种稳定性良好,光束质量接近衍射极限,具有相位关联特性的连续波单频双波长激光器可以用来制备稳定的双色光阱和通过泵浦多个光学参量

(OPO)实现多组份纠缠态光场的产生,进而分别应用于冷原子物理和量子网络通信的研究。

#### 参考文献:

- [1] Kimble H J. The Quantum Internet[J]. *Nature*,2008,**10**(8):453(7198),1023-1030. DOI: 10.1038/nature07127.
- [2] Kómár P,Kessler E M,Bishof M,*et al.* A Quantum Network of Clocks [J]. *Nat Phys*,2014,**10**(8):582-587. DOI: 10.1038/NPHYS3000.
- [3] Wineland D J,Itano W M. Laser Cooling of Atoms [J]. *Phys Rev A*,1979,**20**(4):1521-1540. DOI:10.1103/PhysRevA.20.1521.
- [4] Abbott B P,Abbott R,Abbott T D,*et al.* Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger [J]. *Phys Rev Lett*,2016,**116**(6):061102. DOI:10.1103/PhysRevLett.116.061102.
- [5] LU Huadong,SU Jing,ZHENG Yaohui,*et al.* Physical Conditions of Single-longitudinal-mode Operation for High-power All-solid-state Lasers [J]. *Opt Lett*,2014,**39**(5):1117-1120. DOI:10.1364/OL.39.001117.
- [6] YIN Qiwei,LU Huadong,Peng Kunchi. Investigation of the Thermal Lens Effect of the TGG Crystal in High-power Frequency-doubled Laser with Single Frequency operation [J]. *Opt Express*,2015,**23**(4):4981-4990. DOI:10.1364/OE.23.004981.
- [7] YIN Qiwei,LU Huadong,SU Jing,*et al.* High Power Single-frequency and Frequency-doubled Laser with Active Compensation for the Thermal Lens Effect of Terbium Gallium Garnet Crystal[J]. *Opt Lett*,2016,**41**(9):2033-2036. DOI: 10.1364/OL.41.002033.
- [8] WU Xuecheng,JIANG Haoyu,CAO Kailin,*et al.* Self-calibrated Global Rainbow Refractometry: a Dual-wavelength Approach [J]. *Chin Opt Lett*,2017,**15**(4):042902. DOI: 10.3788/COL201715.042902.
- [9] YAN Dexian,WANG Yuye,XU Degang,*et al.* High-average-power, High-repetition-rate Tunable Terahertz Difference Frequency Generation with GaSe Crystal Pumped by 2  $\mu\text{m}$  Dual-wavelength Intracavity KTP Optical Parametric Oscillator [J]. *Photon Res*,2017,**5**(2):82-87. DOI: 10.1364/PRJ.5.000082.
- [10] Ahmad H,Amiri I S,Zulkifli A Z,*et al.* Stable Dual-wavelength Erbium-doped Fiber Laser Using Novel Fabricated Side-polished Arc-shaped Fiber with Deposited ZnO Nanoparticles [J]. *Chin Opt Lett*,2017,**15**(1):011403. DOI:10.3788/COL201715.011403.
- [11] Kaneda Y,Kubota S. Continuous-wave 355-nm Laser Source Based on Doubly Resonant Sum-frequency Mixing in an External Resonator [J]. *Opt Lett*,1995,**20**(21):2204-2206. DOI:10.1364/OL.20.002204.
- [12] Kuhr S,Alt W,and Schrader D,*et al.* Deterministic Delivery of a Single Atom [J]. *Science*,2001,**293**(5528):278-280. DOI: 10.1126/science.1062725.
- [13] Huang Lianghui,Meng Zengming,Wang Pengjun,*et al.* Experimental Realization of Two-dimensional Synthetic Spin-orbit Coupling in Ultracold Fermi Gases [J]. *Nat Phys*,2016,**12**(6):540-544. DOI: 10.1038/NPHYS3672.
- [14] 柴世杰,王鹏军,付正坤,等. 玻色-费米气体量子简并光学偶极阱的设计[J]. 量子光学学报,2012,**18**(2):67-73.
- [15] SU Xiaolong,ZHAO Yaping,HAO Shuhong,*et al.* Experimental Preparation of Eight-partite Linear and Two-diamond Shape Cluster States for Photonic Qumodes [J]. *Opt Lett*,2012,**37**(24):5178-5180. DOI:10.1364/OL.37.005178.
- [16] 苏晓龙,谭爱红,贾晓军,等. 连续变量四组份纠缠态光场的产生[J]. 量子光学学报,2006(b08):6-7.
- [17] 贾晓军,苏晓龙,潘庆,等. 具有经典相干性的两组 EPR 纠缠态光场的实验产生[J]. 量子光学学报,2004,**54**(s1):41-41.
- [18] 伊肖静,杨超,陈檬,等. 高效 LD 侧面泵浦腔外倍频绿光激光器[J]. 量子光学学报,2012,**18**(2):113-118.
- [19] LI Yongming,ZHANG Sujing,LIU Jianli,*et al.* Quantum Correlation between Fundamental and Second-harmonic Fields via Second-harmonic Generation [J]. *J Opt Soc Am B*,2007,**24**(3):660-663. DOI: 10.1364/JOSAB.24.000660.
- [20] LI Yongming,GUO Xiaomin,WANG Xuyang,*et al.* Observation of Two-color Continuous Variable Quantum Correlation at 0.8 and 1.5  $\mu\text{m}$  [J]. *J Opt Soc Am B*,2010,**27**(4):842-843. DOI: 10.1364/JOSAB.27.000842.
- [21] ZHENG Z,WEINER A M. Spectral Phase Correlation of Coded Femtosecond Pulses by Second-harmonic Generation in Thick Nonlinear Crystals [J]. *Opt Lett*,2000,**25**(13):984-986. DOI: 10.1364/OL.25.000984.

- [22] Horowicz R J. Quantum Correlation between Fundamental and Second Harmonic in SHG [J]. *Europhys Lett*, 1989, **10**(6):537-542.
- [23] GUO Yongrui, LU Huadong, YIN Qiwei, *et al.* Intra-cavity Round-trip Loss Measurement of All-solid-state Single-frequency Laser by Extra Nonlinear Loss [J]. *Chin Opt Lett*, 2017, **15**(2):021402. DOI: 10.3788/COL201715.021402.
- [24] ZHANG Chenwei, LU Huadong, YIN Qiwei, *et al.* Continuous-wave Single-frequency Laser with Dual Wavelength at 1064 and 532 nm [J]. *Appl Opt*, 2014, **53**(28):6371-6374. DOI: 10.1364/AO.53.006371.
- [25] 卢华东, 彭堃堃. 操控非线性损耗实现稳定的高功率单频激光及可调谐激光的输出[J]. 量子光学学报, 2015, **21**(2): 171-176. DOI:10.3788/asqo20152102.0171.

## Phase Correlated CW Single-frequency Dual-wavelength 1064/532 nm Laser with Both 10-W-level Output Power

SHI Zhu<sup>1,2</sup>, GUO Yong-rui<sup>1,2</sup>, YIN Qi-wei<sup>1,2</sup>, SU Jing<sup>1,2</sup>, LU Hua-dong<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices,

Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China;

2. Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

**Abstract:** Phase correlated continuous-wave (CW) single-frequency dual-wavelength 1064/532 nm laser with both 10-W-level output power is presented in this paper. By choosing the transmission of the output coupler and analyzing its influence on the thermal focal length of the terbium gallium garnet (TGG) crystal, a figure-eight-shaped ring cavity including a nonlinear crystal is designed and a phase correlated dual-wavelength 1064/532 nm laser is achieved. When the output coupler with transmission of 4% at 1064 nm and the nonlinear crystal  $\text{LiB}_3\text{O}_5$  (LBO) with the length of 20 mm in the experiment, a phase correlated single-frequency dual-wavelength laser with output power of 11.30 W at 1064 nm and 11.23 W at 532 nm is realized simultaneously. The measured long-term stabilities of 1064 and 532 nm laser for 3 hours are better than  $\pm 0.68\%$  and  $\pm 0.56\%$ , respectively. The measured beam quality  $M^2$  of 1064 and 532 nm lasers both are less than 1.1. The obtained phase correlated dual-wavelength laser can be utilized to generate the stable dual color optical trap and to pump multiple OPO to generate multi-partite entangled states, respectively.

**Key words:** diode pumped; frequency doubled; ring; single-mode; solid-state