

双重复频率锁模 Yb:YAG 陶瓷激光器

杨超 顾澄琳 刘洋 王超 李江 李文雪

Dual repetition-rate mode-locked Yb:YAG ceramic laser

Yang Chao Gu Cheng-Lin Liu Yang Wang Chao Li Jiang Li Wen-Xue

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 094206 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20172345

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20172345>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I9>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[Nd:YSAG 单晶的光谱和激光性能](#)

Spectral and laser properties of Nd:YSAG single crystal

物理学报.2017, 66(15): 154204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.154204>

[885nm 双端泵准连续微秒脉冲 1319nm 三镜环形腔激光](#)

A quasi-continuous dual-end 885 nm diode-pumped three-mirror ring-cavity laser operating at 1319 nm

物理学报.2016, 65(15): 154205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.154205>

[掺镱硼酸钙氧钇飞秒激光器及在拉锥光纤中产生跨倍频程超连续光](#)

Generation of octave-spanning super-continuum in tapered single mode fibre pumped by femtosecond Yb:YCOB laser

物理学报.2015, 64(5): 054206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.054206>

[角抽运 Nd:YAG 复合板条 946 nm 连续运转激光器](#)

Corner-pumped Nd:YAG/YAG composite slab continuous-wave 946 nm laser

物理学报.2013, 62(14): 144205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.144205>

[用于光生毫米波的双频微片激光器热致频差特性研究](#)

Thermally induced frequency difference characteristics of dual-frequency microchip laser used optical generation millimeter-wave

物理学报.2013, 62(20): 204205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.204205>

# 双重复频率锁模 Yb:YAG 陶瓷激光器\*

杨超<sup>1)</sup> 顾澄琳<sup>1)</sup> 刘洋<sup>1)</sup> 王超<sup>1)</sup> 李江<sup>2)</sup> 李文雪<sup>1)†</sup>

1) (华东师范大学, 精密光谱科学与技术国家重点实验室, 上海 200062)

2) (中国科学院上海硅酸盐研究所, 中国科学院透明光功能无机材料重点实验室, 上海 201899)

(2017年10月30日收到; 2017年12月20日收到修改稿)

近年来, 双重复频率锁模激光器在诸如双光梳光谱和异步光学采样等应用领域吸引了广泛关注. 基于单一激光腔的双梳系统能大大降低成本, 简化系统结构, 且性能优异. 双重复频率锁模激光器为发展紧凑型 and 实用型双梳装置开辟了道路. 本文报道了一种可用作双光梳光谱系统光源的双重复频率锁模 Yb:YAG 陶瓷激光器. 该激光器基于半导体可饱和吸收镜锁模技术, 采用双通道抽运结构, 利用新型非水基流延成型制备的 Yb:YAG 透明陶瓷, 在单一的五镜腔中, 当吸收抽运光功率为 5.6 W 时, 实现了自启动、稳定运转的双重复频率锁模脉冲 Pulse1 和 Pulse2, 其重复频率分别为 448.918 和 448.923 MHz, 重复频率差为 5 kHz. 在吸收抽运功率为 7 W 时, 得到最大的总平均输出功率 170 mW, 其中 Pulse1 和 Pulse2 的功率分别为 89 和 81 mW, 相应的光谱宽度分别为 1 和 1.16 nm. 性能相似的双重复频率脉冲彼此间保持了良好的相干性, 实验结果证明了双通道抽运在双重复频率锁模激光器应用中的可行性, 此种新型双重复频率激光器在双光梳光谱和测距等领域具有较好的应用潜力.

**关键词:** 双重复频率锁模, 超快激光, 超快光谱学

**PACS:** 42.55.Xi, 42.65.Re, 42.62.Fi

**DOI:** 10.7498/aps.67.20172345

## 1 引言

双光梳精密测量技术在实时双光梳光谱<sup>[1-4]</sup>、双光梳测距<sup>[5,6]</sup>、异步光学采样光谱探测<sup>[7]</sup>和光纤布拉格光栅传感<sup>[8]</sup>等领域具有重要的应用. 与传统的依赖高精度机械动镜扫描技术的傅里叶光谱仪相比, 双光梳光谱技术具有静态光外差探测、超高光谱分辨率、高灵敏度、超高采样速率等一系列突出优势, 近年来取得了飞速发展. 原理上, 双光梳光谱技术是采用两个重复频率稍有差异的光学频率梳拍频产生一个稳定的微波梳, 实现光学频率一对一地下转换到电学元件可探测的微波频段, 再通过光电探测器采集拍频后的时域干涉图, 将该图样进行傅里叶变换等数据处理后, 重建光学频率梳的频域光谱信息. 应用上, 目前多数双光梳系统是

基于两台独立运行的锁模激光器种子源搭建, 且需要配套的稳定控制电路模块、功率放大模块和超连续谱产生模块, 因而, 整套系统结构复杂、体积庞大、成本高昂、维护困难, 这些缺陷极大地制约了双光梳系统在实验室之外环境的实用性.

为了简化系统, 并实现在复杂的开放环境中稳定运行, 设计紧凑型、环境免疫型的双光梳系统是其走向实用化的发展方向. 一个简单实现方法就是基于新型双重复频率锁模激光器<sup>[9]</sup>进行双光梳光谱探测, 即用同一个谐振腔产生重复频率稍有差异的两套锁模脉冲序列取代两个独立的锁模激光器作为双光梳系统的种子源. 双重复频率锁模脉冲共享同一个腔而具有内在相干性、相对稳定的重复频率差、近似的激光参数、廉价的成本、易集成化等一系列优势, 其下转换得到的微波频率梳可以实

\* 国家自然科学基金(批准号: 11422434, 11621404, 61575212)、国家重大科学仪器设备开发专项(批准号: 2012YQ150092)、上海市“曙光”计划(批准号: 16SG22)和上海市浦江人才计划(批准号: 17PJ1402300)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wxli@phy.ecnu.edu.cn

现梳齿分辨精度,具有良好的快漂特征,是理想的实时双光梳光源. 基于双重复频率锁模激光器的单腔双光梳光谱已经成为研究热点<sup>[10-13]</sup>,对推动双光梳系统小型化和集成化具有重要的意义. 迄今为止,已报道的双重复频率脉冲激光器类型涵盖有光纤激光器、半导体激光器和固体激光器. 对于基于光纤的双重复频率锁模激光器,2013年,中国科学院西安光学精密机械研究所<sup>[14]</sup>基于掺铒光纤双向环形腔获得了重复频率为11 MHz的稳定双重复频率锁模脉冲输出. 2014年, Gong等<sup>[15]</sup>首次在掺铒光纤环形腔激光器中加入一段全保偏光纤引入双折射,通过平衡快、慢轴模式的增益和损耗实现了双重复频率锁模. 2016年, Kolano等<sup>[16]</sup>首次实现了基于全保偏光纤的双重复频率锁模脉冲输出. 2017年, Liao等<sup>[17]</sup>实现了基于非线性放大环形镜锁模机制的2  $\mu\text{m}$ 波段的双重复频率飞秒掺铥光纤激光器. 上述双重复频率锁模光纤激光器的重复频率都较低,而重复频率决定了双光梳光谱的采样速率和光谱测量范围,高重复频率在高速、宽谱双光梳光谱等前沿领域具有独特的实用性. 固体激光器和半导体激光器是获得单脉冲能量大、稳定性好的高重复频率锁模脉冲的极佳选择. 2015年, Link等<sup>[9]</sup>首次将半导体增益介质和半导体可饱和吸收体集成为芯片,在直线型腔内插入方解石晶体实现了1.8 GHz的双重复频率偏振正交的锁模集成外腔面发射激光器. 同年, Chang等<sup>[18]</sup>充分利用Yb:KYW晶体材料的双折射效应和高非线性折射率特征,实现了重复频率高达25 GHz的光学主轴 $N_p$ 和 $N_m$ 偏振正交的双重复频率自锁模脉冲输出. 2016年, Ideguchi等<sup>[12]</sup>在双向环形腔钛宝石激光器中实现了重复频率为932 MHz的双重复频率自锁模飞秒脉冲输出,并验证了双重复频率脉冲间的相对稳定性、良好的时间相干性以及应用于双光梳光谱探测的可行性.

本文报道的双重复频率锁模Yb:YAG激光器采用新型非水基流延成型制备的Yb:YAG透明陶瓷作为增益介质,该介质具有生长周期短、造价低、结构致密、允许复合结构生长、抗损伤阈值高、离子可掺杂浓度高、导热性能优异和量子效率高等一系列优势,适合产生高效的高重复频率超短脉冲<sup>[19-22]</sup>. 同时,采用双通道抽运技术,实现了双脉冲光束在腔内空间光路径分离,产生了双重复频率脉冲输出,同时避免了双重复频率脉冲序列间的互

相干扰,通过半导体可饱和吸收体锁模机制实现了稳定的自启动双重复频率锁模皮秒脉冲输出. 空间完全分离的双重复频率脉冲的重复频率分别为448.918和448.923 MHz,重复频率差为5 kHz,相应的双重复频率脉冲宽度分别为2.8和2.6 ps,实验结果验证了双通道抽运技术在双重复频率锁模激光器应用中的可行性,且此新型的双重复频率振荡器是一种可供选择的紧凑型单腔基双光梳光谱测量系统的种子源.

## 2 实验装置

双重复频率锁模Yb:YAG陶瓷激光器的实验装置如图1所示. 为实现双重复频率锁模脉冲运行,利用两块相同的偏振分束器(AR@940 nm,即镀940 nm增透膜)和两片半波片设计了双通道抽运结构. 实验中,使用中心波长和尾纤芯径分别为940 nm和105  $\mu\text{m}$ 的激光二极管作为抽运源,其最大输出功率为30 W,两片消色差胶合透镜对抽运光进行准直,准直后的抽运光功率在双通道抽运结构中先被第一块偏振分束器平分成Pump1和Pump2两路,抽运光路在图1中用紫色显示,然后两支路抽运光再经过另一块偏振分束器进行合束,合束的双通道抽运光通过一块焦距为50 mm的消色差胶合透镜分别聚焦在Yb:YAG陶瓷内两处,在两块偏振分束器间插入的半波片作为抽运衰减器用来单独控制入射陶瓷的分路抽运光的强度. 实验采用的五镜腔结构由一块半导体可饱和吸收镜(SESAM)和四片腔镜构成,其中M1是平面双色镜(AR@976 nm,

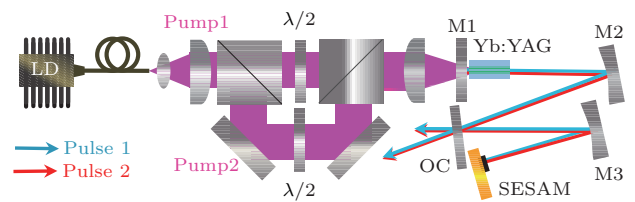


图1 双重复频率锁模Yb:YAG陶瓷激光器实验装置图 (Pump1和Pump2是抽运光的两个通道; M1, M2, M3均为双色镜; LD为半导体二极管; SESAM为半导体可饱和吸收镜; OC为输出耦合镜;  $\lambda/2$ 为半波片)

Fig. 1. Schematic of the dual-comb mode-locked Yb:YAG ceramic laser. Where, Pump1 and Pump2, two path of pump lasers, respectively; M1, M2, M3, dichroic mirrors; LD, laser diode; SESAM, semiconductor saturable absorber mirror; OC, output coupler;  $\lambda/2$ , half wave plate.

在 976 nm 处透射率  $T > 95\%$ ; HR@1020—1130 nm, 即镀 1020—1130 nm 波段高反膜, 反射率  $R = 99.99\%$ ), M2 和 M3 (AR@976 nm,  $T > 95\%$ ; HR@1020—1130 nm,  $R = 99.99\%$ ) 均为球凹面镜, 曲率半径分别为 200 和 100 mm, 输出镜 OC (HR@1020—1120 nm) 的透射率是 2%, SESAM 的饱和能量密度和饱和吸收系数分别为  $70 \mu\text{J}/\text{cm}^2$  和 2%. Yb:YAG 陶瓷样品被铝箔均匀紧裹装置在  $14^\circ\text{C}$  的水冷纯铜热沉上以消除热负荷, 从而保证稳定高效的激光输出. 通过计算 ABCD 矩阵, 可得腔模在陶瓷内部和 SESAM 表面的束腰直径分别为 113 和  $59 \mu\text{m}$ , 通过优化陶瓷内和 SESAM 表面上的光斑束腰以及抽运光与腔模的重叠度, 微调 M2 平衡双脉冲光束在同一腔内的损耗, 可使振荡器产生稳定的双重复频率锁模脉冲.

### 3 实验结果与讨论

实验中, 首先, 使 Pump1 单独抽运, 在足够抽运功率下, 精细优化谐振腔参数, 先实现 Pulse1 稳定锁模; 其次, 使 Pump2 单独抽运, 在足够的抽运功率下, 精细调节 Pump2 相对于 Pump1 的方位, 实现 Pulse2 稳定锁模; 然后, 对 Pump1 和 Pump2 合束进行抽运, 并调整双束抽运光的相对位置至聚焦光斑在陶瓷内部分离, 辅助微调 M2 偏角平衡双脉冲在腔内损耗, 使得输出双脉冲激光光斑空间分离且亮度相当, 反复优化, 最终得到稳定的光束空间分离的双重复频率锁模脉冲输出. 图 2 所示为双重复频率锁模脉冲平均输出功率随吸收抽运功率的变化曲线. 由图 2 可知, 从连续激光起振到双重复频率脉冲锁模的过程, 先后共出现三种激光运转状态, 当吸收抽运功率小于 4.8 W 时, 激光器处于双连续波运转状态, 两激光在实现连续运转输出时的阈值抽运功率分别为 2.5 和 3.3 W, 说明两束光在谐振腔内运行时的损耗不同. Pulse1 和 Pulse2 双连续波运转时的最大功率分别为 45 和 34 mW; 当吸收抽运功率在 4.8—5.6 W 时, 激光器处于 Pulse1 锁模状态, 此时 Pulse2 由于损耗较大仍旧处于连续运转状态; 当吸收功率高于 5.6 W 时, 激光器进入双重复频率锁模状态, Pulse1 和 Pulse2 同时稳定锁模, 双重复频率同时锁模, 总输出功率阈值为 122 mW, 且当吸收功率高于 6.5 W 时, 激光器输出功率逐渐趋于饱和, 在吸收功率达

到 7 W 时, 双脉冲输出平均功率之和达到最大值 170 mW, 其中, Pulse1 和 Pulse2 的平均功率分别为 89 和 81 mW. 相同的抽运功率下, Pulse1 平均功率始终高于 Pulse2, 说明它们在腔内往复振荡的损耗不同. 双重复频率脉冲的输出功率以相近的斜效率随吸收抽运功率线性变化, 且双重复频率锁模脉冲的总功率等于两列脉冲单独锁模时的功率之和, 说明空间分离的双重复频率锁模脉冲序列之间没有发生增益竞争, 彼此稳定运行互不串扰. 在实验中, 还发现当两束脉冲在 Yb:YAG 陶瓷内部部分相交时, 双脉冲之间发生增益竞争, 造成双重复频率锁模不稳定. 此时, 双重复频率同时锁模时输出总功率小于双重复频率脉冲在单独锁模时的功率之和.

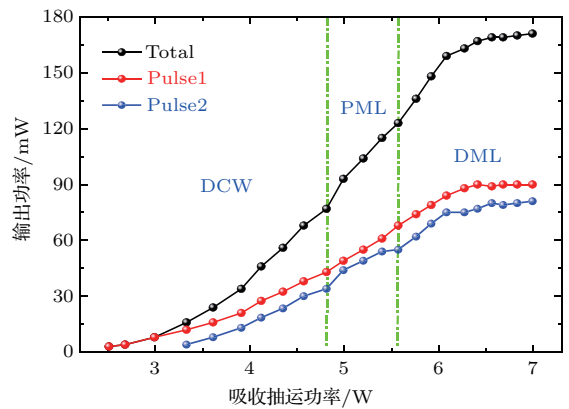


图 2 双重复频率脉冲输出平均功率随吸收抽运功率的变化 (Pulse1 和 Pulse2 分别指代两套重复频率脉冲; DCW 为双连续波运转状态; PML 为 Pulse1 单锁模状态; DML 为双重复频率锁模状态)

Fig. 2. Average output power of dual frequency-rate pulses versus absorbed pump power. Where, Pulse1 and Pulse2, two mode-locked pulses with different repetition-rates; DCW, dual-continuous wave state; PML, Pulse1 single-mode-locked state; DML: dual repetition-rate mode-locked state.

将空间完全分离的双重复频率脉冲在腔外合束进行拍频, 利用数字示波器 (RIGOL, DS6102) 和频谱分析仪 (Agilent, N9010A) 分别记录下双重复频率锁模脉冲序列和射频频谱. 如图 3 (a) 所示, 双重复频率锁模脉冲的干涉信号时间周期约为 0.2 ms, 在 5 h 观测时间内, 锁模状态维持了良好的稳定性. 图 4 (b) 所示为双重复频率脉冲的重复频率及重复频率差. Pulse1 和 Pulse2 的重复频率分别约为 448.918 和 448.923 MHz, 信噪比达 60 dB, 重复频率差为 5 kHz, 重复频率差主要来自于双重复频率脉冲在腔内光路之间微小的夹角; 增益介质的非线性折射率随抽运功率强度变化也会影



响重复频率差。在这里，定义双脉冲之间夹角为  $\theta$ ，假设腔长为  $L$ ，那么它的重复频率  $f$  可以表达为  $f = c/(2L)$ 。考虑到球面全反镜并不会使平行入射的两束光产生光程差以及在腔内严格平行运转的两束光的光程相等，根据几何关系，可以得到夹角为  $\theta$  的双光束在腔内往复运转一次产生的光程差  $\Delta L$  近似为

$$\Delta L \approx 2\sin^2\frac{\theta}{2}/L, \quad (1)$$

其中  $\theta \ll \pi/2$ ,  $\sin\frac{\theta}{2} \approx \frac{\theta}{2}$ ，则 (1) 式进一步简化为

$$\Delta L \approx \frac{\theta^2}{2}L, \quad (2)$$

从 (2) 式可知，当双脉冲之间夹角  $\theta$  不为零时，光程差  $\Delta L$  也不为零，从而导致同一个腔内运行的两列脉冲具有一定的重复频率差，于是，双重复频率脉冲的重复频率差  $\Delta f$  可表达为

$$\Delta f \approx \frac{\theta^2}{2}f, \quad (3)$$

由 (3) 式可以看出，重复频率差  $\Delta f$  是双光束夹角  $\theta$  的二次函数，当  $\theta = 0$ ，即双光束在腔内平行时，

最小重复频率差值为 0，在实验中可通过调节 Pump2 通道的抽运光入射角度来改变双脉冲之间的夹角  $\theta$ ，实现对重复频率差连续调谐。此外，通过半波片衰减器调节抽运光功率，也可以对重复频率差进行精细调谐。

实验中，分别采用光谱仪 (YOKOGAWA, AQ6370C) 和自相关仪 (APE, Pulse Check) 测量了双重复频率锁模脉冲的光谱和脉宽。图 4(a) 所示为相同抽运功率下双重复频率锁模脉冲 Pulse1 和 Pulse2 的光谱，光谱仪的分辨率为 0.2 nm，两束脉冲光谱形状相似，中心波长略微不一致，分别为 1029.6 和 1029.8 nm，且相对应的光谱半高全宽分别为 1 和 1.16 nm。这是由于双重复频率脉冲列在腔内往复运转损耗不同造成的。如图 4(b) 所示，双重复频率锁模脉冲的强度自相关信号与高斯线型良好拟合，得到 Pulse1 和 Pulse2 的脉冲宽度分别为 2.8 和 2.6 ps，脉冲的时间带宽积分别为 0.79 和 0.85，借助色散补偿技术可进一步同时压缩双重复频率脉冲宽度。

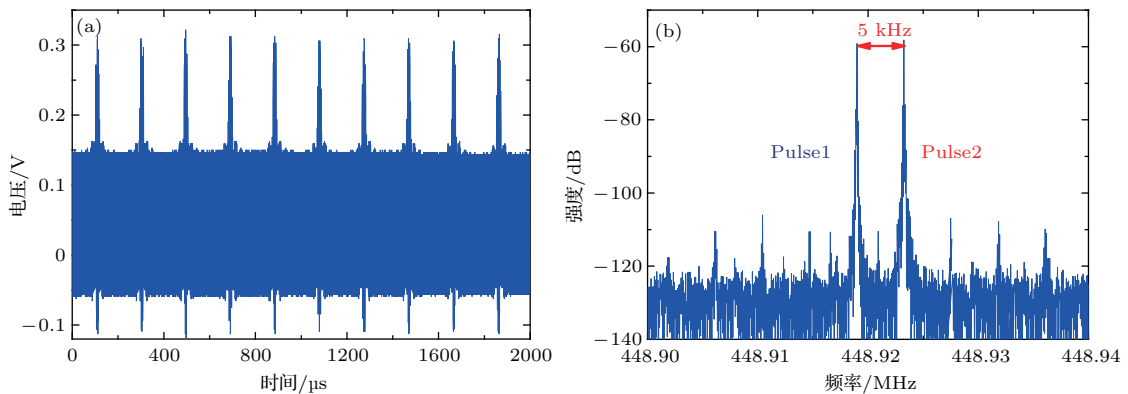


图 3 双重复频率脉冲 Pulse1 和 Pulse2 的 (a) 锁模脉冲序列和 (b) 重复频率频谱  
Fig. 3. (a) Mode-locking pulse trains and (b) ratio spectra for Pulse1 and Pulse2 as dual frequency-rate pulses.

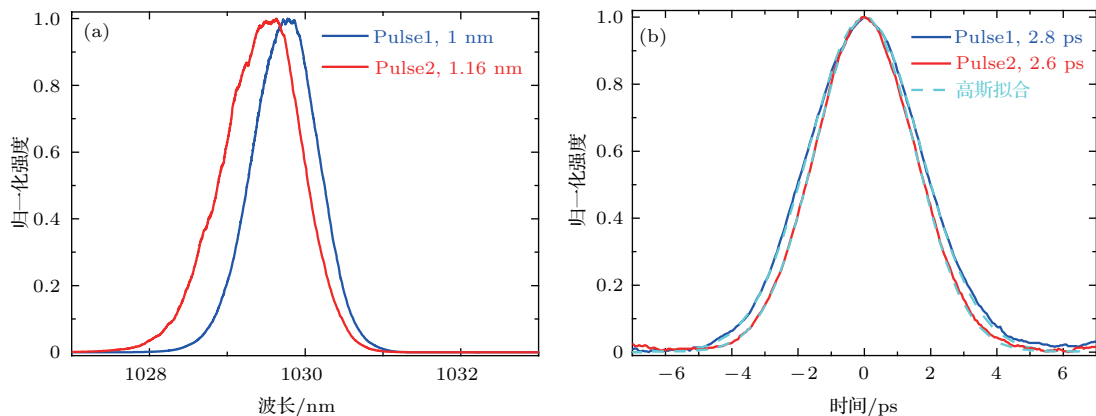


图 4 双重复频率锁模脉冲 Pulse1 和 Pulse2 的 (a) 光谱和 (b) 自相关轨迹  
Fig. 4. (a) Optical spectra and (b) autocorrelation traces of both dual repetition-rate Pulse1 and Pulse2.

## 4 结 论

本文报道了基于新型非水基流延成型制备的Yb:YAG透明陶瓷,采用双通道抽运结构和SESAM锁模技术,通过精细地优化腔型参数,在单一五镜腔中实现了稳定的高重复频率双锁模脉冲运行.脉冲序列Pulse1和Pulse2的重复频率分别为448.918和448.923 MHz,重复频率差约为5 kHz,双重复频率脉冲序列Pulse1和Pulse2的脉冲宽度分别为2.8和2.6 ps,各自对应的光谱宽度分别为1和1.16 nm.实验结果证明了双通道抽运技术在双重复频率锁模激光器应用的可行性,与已有研究相比,我们的实验方案兼具自启动、高重复频率和双重复频率脉冲空间分离输出等特点,是一种可供选择的单腔基双光梳光谱系统的光源设计方案,将大大降低双光梳系统的复杂性和成本,提升双光梳光谱系统在复杂环境中的稳定性.今后,通过缩短腔长、利用高增益的介质结合啁啾镜色散补偿技术,有望获得重复频率更高、脉宽更窄和性能更加优异的双重复频率锁模飞秒脉冲<sup>[23,24]</sup>.

## 参考文献

- [1] Keilmann F, Gohle C, Holzwarth R 2004 *Opt. Lett.* **29** 1542
- [2] Schliesser A, Brehm M, Keilmann F, van der Weide D 2005 *Opt. Express* **13** 9029
- [3] Coddington I, Swann W C, Newbury N R 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 013902
- [4] Bernhardt B, Ozawa A, Jaquet P, Jacquy M, Kobayashi Y, Udem T, Holzwarth R, Guelachvili G, Hänsch T, Piqué N 2010 *Nat. Photon.* **4** 55
- [5] Coddington I, Swann W C, Nenadovic L, Newbury N R 2009 *Nat. Photon.* **3** 351
- [6] Zhang H Y, Wei H Y, Wu X J, Yang H L, Li Y 2014 *Opt. Express* **22** 6597
- [7] Bartels A, Cerna R, Kistner C, Thoma A, Hudert F, Janke C, Dekorsy T 2007 *Rev. Sci. Instrum.* **78** 035107
- [8] Hill K O, Fujii Y, Johnson D C, Kawasaki B S 1978 *Appl. Phys. Lett.* **32** 647
- [9] Link S M, Klenner A, Mangold M, Zaugg C A, Golling M, Tilma B W, Keller U 2015 *Opt. Express* **23** 5521
- [10] Zhao X, Hu G Q, Zhao B F, Li C, Pan Y L, Liu Y, Yasui T, Zheng Z 2016 *Opt. Express* **24** 21833
- [11] Mehravar S, Norwood R A, Peyghambarian N, Kieu K 2016 *Appl. Phys. Lett.* **108** 231104
- [12] Ideguchi T, Nakamura T, Kobayashi Y, Goda K 2016 *Optica* **3** 748
- [13] Link S M, Maas D J H C, Waldburger D, Keller U 2017 *Science* **356** 1164
- [14] Zeng C, Liu X M, Yun L 2013 *Opt. Express* **21** 18937
- [15] Gong Z, Zhao X, Hu G, Liu J, Zheng Z 2014 *Conference on Lasers and Electro-Optics* San Jose, USA, June 8–13, 2014 pJTh2A.20
- [16] Kolano M, Gräf B, Molter D, Ellrich F, von Freymann G 2016 *Conference on Lasers and Electro-Optics* San Jose, USA, June 5–10, 2016 pAM2J.3
- [17] Liao R Y, Song Y J, Chai L, Hu M L 2017 *Conference on Lasers and Electro-Optics: Science and Innovations* San Jose, USA, May 14–19, 2017 pSM4L.5
- [18] Chang M T, Liang H C, Su K W, Chen Y F 2015 *Opt. Express* **23** 10111
- [19] Bai D B, Li W X, Yang X H, Ba X W, Li J, Pan Y B, Zeng H P 2015 *Opt. Mater. Express* **5** 330
- [20] Wang C, Li W X, Bai D B, Zhao J, Li J, Ba X W, Ge L, Pan Y B, Zeng H P 2016 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **28** 433
- [21] Wang C, Li W X, Yang C, Bai D B, Li J, Ge L, Pan Y B, Zeng H P 2016 *Sci. Rep.* **6** 31289
- [22] Bai D B, Li W X, Wang C, Liu Y, Li J, Ge L, Pan Y B, Zeng H P 2016 *Conference on Lasers and Electro-Optics* San Jose, USA, June 5–10, pSF2I.3
- [23] Klenner A, Golling M, Keller U 2013 *Opt. Express* **21** 10351
- [24] Klenner A, Golling M, Keller U 2014 *Opt. Express* **22** 11884

# Dual repetition-rate mode-locked Yb:YAG ceramic laser\*

Yang Chao<sup>1)</sup> Gu Cheng-Lin<sup>1)</sup> Liu Yang<sup>1)</sup> Wang Chao<sup>1)</sup> Li Jiang<sup>2)</sup> Li Wen-Xue<sup>1)†</sup>

1) (State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

2) (Key Laboratory of Transparent and Opto-functional Inorganic Materials, Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201899, China)

( Received 30 October 2017; revised manuscript received 20 December 2017 )

## Abstract

In recent years, dual repetition-rate mode-locked lasers with slightly different pulse repetition rates, as newly developed ultrafast lasers, have attracted great interest and shown their applications in ultrafast dual-comb spectroscopy, asynchronous optical sampling without mechanical movement, etc. The traditional dual-comb system composed of a pair of independent optical frequency combs with slightly detuned comb spacing is still considered expensive, complex and fragile. It is imperative to develop practical and compact dual-comb devices. Dual repetition-rate ultrafast lasers generating asynchronous ultrafast pulses directly from a single cavity can be a promising alternative to the current dual-laser-based comb source. A dual-comb setup based on single laser has the advantages of compact structure, low cost and intrinsic mutual coherence. This technique paves the way for developing the compact, robust and environmental-immune dual-comb systems. In this paper we develop an alternative dual repetition-rate mode-locked Yb:YAG ceramic laser that emits a pair of pulses with spatially separated beams from a single cavity by using a semiconductor saturable absorber mirror and a dual-path pump configuration. In our experiment, a high quality transparent Yb:YAG ceramic prepared by non-aqueous taper-casting method is selected as the gain medium, which is pumped by a 940 nm laser diode. A dual-path pump configuration consisting of a pair of polarization beam splitters and a pair of half-wave plates is designed, in which total pump power from a laser diode is divided equally for pumping the two separate laser beams. When the total absorbed pump power is 5.6 W, dual repetition-rate continuous mode-locked laser operation is achieved under the gain-loss balanced cavity condition. The pulse repetition rates of Pulse1 and Pulse2 are 448.918 MHz and 448.923 MHz, respectively. The difference between repetition rates is 5 kHz mainly caused by the different optical path lengths in the cavity. Under an absorbed pump power of 7 W, the maximum total output power extracted from this laser reaches 170 mW, i.e., 89 mW for Pulse1 and 81 mW for Pulse2. The two mode-locked pulses have nearly identical spectral shapes centered at 1029.6 nm and 1029.8 nm, respectively. The spectral bandwidths for Pulse1 and Pulse2 are 1 nm and 1.16 nm, respectively. The corresponding pulse durations are 2.8 ps and 2.6 ps for the Pulse1 and Pulse2 respectively. Our scheme integrates the advantages of self-starting operation, high repetition-rate, suppression of gain competition. These results indicate that dual-path pump configuration is feasible for dual-repetition-rate mode-locked lasers. These co-generated, dual repetition-rate pulses from one laser cavity possess similar laser characteristics and can be operated independently by dual-path pump configuration. This laser has potential advantages of compact, cost-effective and high-stability for single-cavity-based dual-comb applications in dual-comb spectroscopy, distance ranging, etc.

**Keywords:** dual-repetition-rate mode locking, ultrafast lasers, ultrafast spectroscopy

**PACS:** 42.55.Xi, 42.65.Re, 42.62.Fi

**DOI:** 10.7498/aps.67.20172345

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11422434, 11621404, 61575212), the National Key Scientific Instrument and Equipment Development Project of China (Grant No. 2012YQ150092), the “Dawn” Program of Shanghai Education Commission, China (Grant No. 16SG22), and the Shanghai Pujiang Talent Program, China (Grant No. 17PJ1402300).

† Corresponding author. E-mail: wxli@phy.ecnu.edu.cn