

文章编号: 1672-8785(2017)03-0012-05

全光纤化自脉冲抑制的连续稳定 运转掺镱光纤激光器

赵 翔^{1,2,3} 郑 也^{1,2,3} 柏 刚^{1,2,3} 杨依枫^{1,2} 陈晓龙^{1,2}

漆云凤^{1,2} 何 兵^{1,2,4} 周 军^{1,2,4,5}

(1. 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800 ;

2. 上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800 ;

3. 中国科学院大学, 北京 100049 ;

4. 南京先进激光技术研究院, 江苏 南京 210038 ;

5. 南京中科神光科技有限公司, 江苏 南京 210038)

摘 要: 光纤中的非线性效应是限制高功率光纤激光器发展的重要因素。通过抑制激光器时域的不稳定性(自脉冲现象), 可以提升非线性效应的阈值。基于全光纤化的谐振腔引入了简单的光纤珐琅腔, 使噪声抖动降至原先的 1/3, 并实现了自脉冲抑制的稳定的连续激光输出。这种简单的腔结构保持了较高的斜率效率(76.5%), 实现了高功率的激光输出(48.7 W 泵浦光产生 36.5 W 激光)。这种腔结构中的全光纤化谐振腔不仅可以用作稳定的连续激光运转激光器, 而且还可以用作更高功率光纤放大器的种子, 用于限制非线性效应的产生。

关键词: 掺镱光纤激光器; 全光纤化; 自脉冲

中图分类号: TN248.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2017.03.003

Continuously and Stably Operative Yb-doped Fiber Laser Suppressed by All-fiberized Self-pulsing

ZHAO Xiang^{1,2,3}, ZHENG Ye^{1,2,3}, BAI Gang^{1,2,3}, YANG Yi-feng^{1,2}, CHEN Xiao-long^{1,2},

QI Yun-feng^{1,2}, HE Bing^{1,2,4}, ZHOU Jun^{1,2,4,5}

(1. Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800,

China; 2. Shanghai Key Laboratory of All Solid-state Laser and Applied Techniques, Shanghai

201800, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

4. Nanjing Institute of Advanced Laser Technology, Nanjing 210038, China;

5. Nanjing Zhongke Shengguang Science & Technology Co., Ltd., Nanjing 210038, China)

Abstract: The nonlinear noise effect in optical fibers is an important factor to limit the development of high power fiber lasers. The threshold of nonlinear effect can be improved by suppressing the time domain instability (self-pulsing phenomenon) of lasers. On the basis of an all-fiber resonator cavity, a si-

收稿日期: 2017-02-20

基金项目: 科技部重点专项(2016YFB0402201); 国家自然科学基金项目(U1330134; 61308024); 上海市自然科学基金项目(16ZR1440100; 16ZR1440200); 江苏省科技支撑计划(BE2014001); 江苏省重点研发计划(BE2016005)

作者简介: 赵翔(1990-), 男, 山东滕州人, 博士研究生, 主要从事高功率光纤激光器方面的研究。

E-mail: zhaoxiangdu@163.com

mple fiber Fabry-Perot cavity is incorporated. The noise dither is reduced to one third of its original value and stable continuous laser output suppressed by self-pulsing is realized. This simple cavity structure can maintain a higher slope efficiency (76.5%) and can implement high power laser output (48.7 W bump light can generate 36.5 W laser). The all fiber resonator cavity in the cavity structure not only can be used as a stable continuous laser, but also can be used as the seed of higher power fiber amplifiers for limiting the generation of nonlinear effect.

Key words: Yb-doped fibre laser; all-fiberized; self-pulsing

0 引言

光纤激光器具有光束质量好、效率高、易于散热、结构紧凑等优点,因此近年来得到了广泛且深入的研究^[1-2]。然而,即使在连续光运转的状态下,光纤激光器也会出现自脉冲现象,造成输出激光功率的不稳定^[3-5]。由于双包层光纤纤芯中的能量密度极高,自脉冲的出现会使光纤内的自相位调制(Self-Phase Modulation, SPM)、受激拉曼散射(Stimulated Raman Scattering, SRS)和受激布里渊散射(Stimulated Brillouin Scattering, SBS)等非线性效应更易出现,从而损伤光纤,使激光器无法稳定运转^[6]。如果能消除种子源的自脉冲现象,那么就可以抑制高功率光纤激光器中的非线性效应。这对实现更高功率的激光装置有着一定的指导意义。

相关研究表明,自脉冲现象可以归因于弛豫振荡和自锁模效应^[7]。其中,弛豫振荡是由上能级反转粒子与谐振腔内的激光相互作用产生的;自锁模效应则是由光纤中的非饱和增益对激光的频率调制引起的,而且调制频率与谐振腔的往返时间相对应。因此,为了抑制谐振腔中的自脉冲现象,研究人员提出了许多用于获得稳定的连续激光输出的方法。例如,Guan W 等人通过在谐振腔中增加传能光纤(>2 km)提高了腔内光子寿命,从而提升了谐振腔输出激光的稳定性^[8]。如此长的传能光纤的引入可以使得激光效率减小和非线性效应(SRS、SBS 和克尔效应等)阈值降低。Mizrahi V 和 Chen H 等人采用强度相关的光学装置(如半导体光放大器)或者电学反馈泵浦装置控制了主动光纤的增益和损耗抑制的自脉冲产生^[9-10]。Loh W H 等人通过在接近激光波长处辅助泵浦或者采用双端

泵浦短腔减少了弛豫谐振^[11]。但是接近激光波长的泵浦源不易获得,而且短腔长的激光功率提升困难,这也限制了这种方法的应用。Hideur A 等人通过用单向环形腔减少谐振纵模数,最终输出了稳定的连续光运转^[12]。隔离器和偏振控制器的引入会增加腔损和复杂性,并且使其很难在高功率下稳定运转。Lee J S 等人通过在谐振腔内插入珐珀腔来选择部分纵模谐振并增加光子寿命,实现了 5.9 W 的稳定连续激光输出^[13]。但是,谐振腔内空间器件的存在会限制功率的进一步提升,而且谐振腔反馈是依靠光纤的端面反射的,这也会导致该谐振腔难以用于下一步的激光放大装置。

本文采用成熟的光纤光栅对作为谐振腔反馈元件,并插入全光纤化的 FP 腔。利用 48.7 W 泵浦光产生了 36.5 W 激光,并在全功率下抑制了自脉冲的产生,保持了稳定的连续激光运转。这种全光纤化的谐振腔装置可以用于更高功率光纤放大器的放大。

1 实验结构

图 1 为谐振腔的实验装置图。其中,泵浦源采用两个尾纤化的半导体激光器,泵浦波长为 976 nm。泵浦源通过 $(2+1) \times 1$ 合束器将泵浦光耦合进增益光纤里。增益光纤采用非保偏大模场双包层光纤,其纤芯和内包层的直径分别为 10 μm 和 130 μm , NA 分别为 0.08 和 0.46;在 976 nm 处,光纤吸收为 4.74 db/m,光纤长度选择 4 m,以保证足够的泵浦吸收。作为腔反馈器件,光纤光栅中高反光栅(HR)的反射率为 99%,半高全宽为 0.2 nm;低反光栅(LR1)的反射率为 10%,半高全宽为 0.05 nm。LR1 熔接在合束器的信号纤上,HR 熔接在腔的另一端以形成反馈

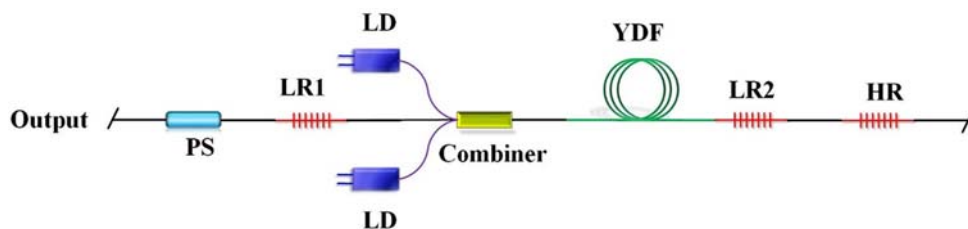


图 1 谐振腔的结构图

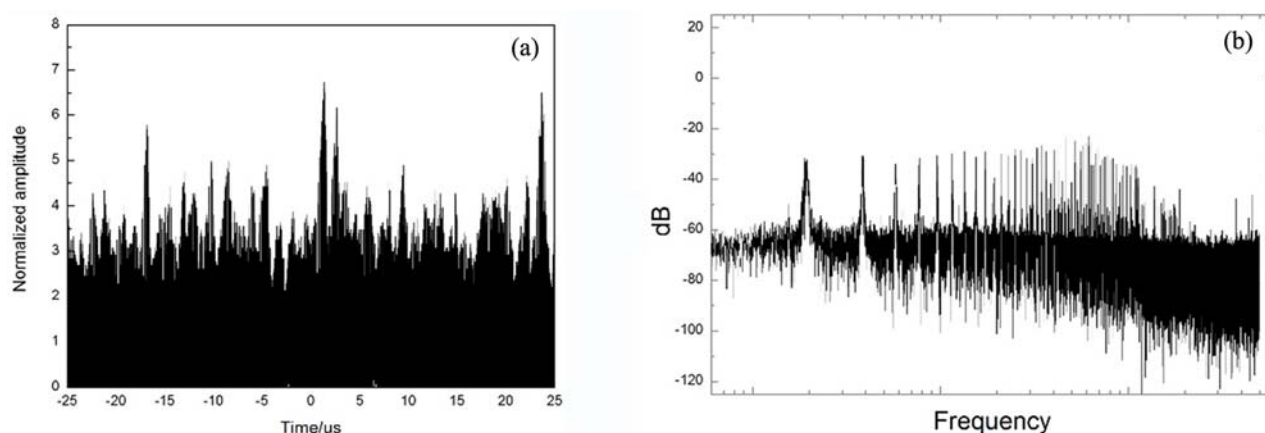


图 2 未插入 LR2 时的输出：(a) 时域；(b) 频域

机制。腔外熔接光纤泵浦滤除器以滤除包层光，输出切斜角以防止端面反射。另外，为了抑制自脉冲现象的发生，在增益光纤与 LR1 之间插入另一个低反光栅 (LR2) 与 HR 形成法珀腔。

2 实验结果与分析

图 2(a) 所示为腔内未插入 LR2 时输出激光的时域稳定性。测试器件为硅基光电探测器和示波器，测试功率为 5 W，测试时间为 50 μs。其中无规律的尖峰脉冲展示了典型的自脉冲现象（峰峰值/平均值=8.56）。图 2(b) 所示为对功率进行傅里叶变换后得到的频域谱。频域峰间隔为 19.6 MHz，对应于 5.1 m 的谐振腔长。

当腔内插入 LR2 时，腔内的自脉冲被抑制，从而输出了稳定的连续激光（见图 3）。在 0.1 ms 的测试时间内，峰峰值/平均值为 2.8，证明在这种新结构下自脉冲得到了抑制。

这种腔结构的自脉冲现象抑制主要归因于 LR2 的插入以及由 HR 形成的光纤法珀腔。光纤法珀腔能够增加腔内光子的寿命，进而抑制自

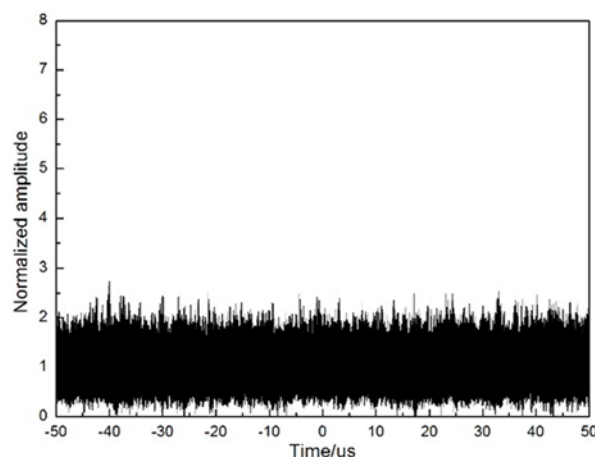


图 3 插入 LR2 时的输出时域

脉冲的产生。腔内光子寿命可以用式 (1) 表达：

$$\tau_c = \frac{2nL}{c(-\ln R_1 R_2 + 2\alpha L)} \quad (1)$$

式中， τ_c 为腔内光子寿命； n 为光纤纤芯的折射率； L 为谐振腔的腔长； R_1 和 R_2 分别为光纤光栅对的反射率； α 为其他损耗。在不引入 LR2 的情况下， $n = 1.452$ ， $L = 5.1$ m， $R_1 = 0.10$ ， $R_2 = 0.99$ ， $\alpha = 5 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ ，腔寿命为 20.9 ns。当引入法珀腔（ $R_1 = 0.10$ ， $R_2 = 0.99$ ， $L = 2$ m）时，腔内寿命增至 29.2 ns，从而有利于自脉冲

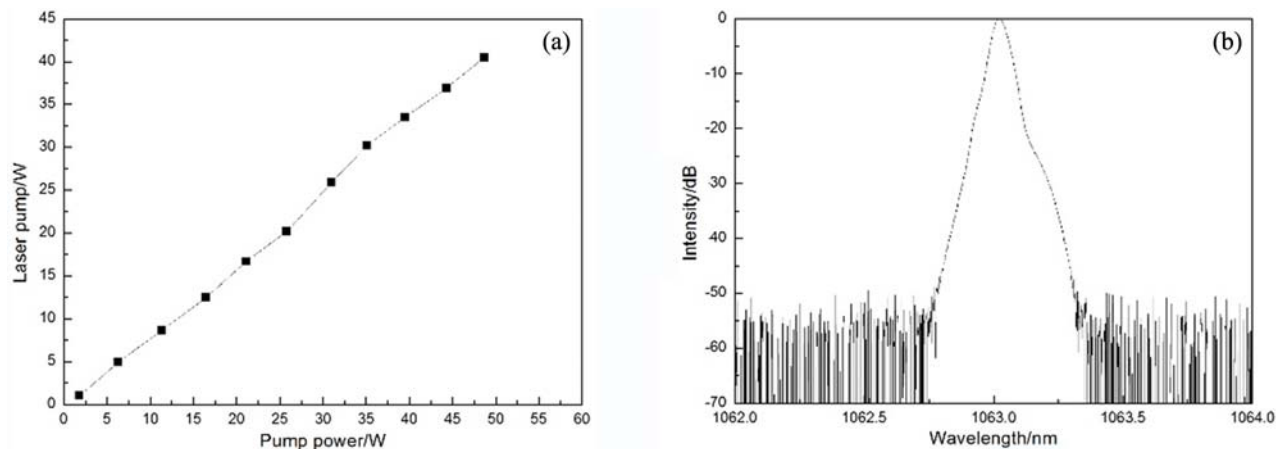


图 4 输出激光: (a) 功率图; (b) 光谱图

现象的抑制。在珐珀腔增加光子寿命的同时, 稳定谐振条件, 并锁定谐振纵模的效果。大多数固体激光器在刚开机时由于模式抖动或者模式跳变经常会出现自脉冲现象, 随后逐渐稳定。但当外界环境不稳定时, 自脉冲现象将会一直存在。在不加 LR2 时, 光纤谐振腔的谐振纵模受环境和增益光线热效应的影响较大。这种抖动会导致持续的寄生谐振, 进而产生持续的自脉冲。在加入 LR2 后, 谐振纵模需要同时满足两个腔结构 (LR1 和 HR、LR2 和 HR), 这将有利于稳定谐振频率。另外, 光纤珐珀腔的光纤属于被动传能光纤, 受环境影响较小。因此, 这种结构更加有利于自脉冲的衰减和抑制。

图 4(a) 所示为输出功率随泵浦光功率的变化情况。在 48.7 W 泵浦光的泵浦下, 输出激光功率为 36.5 W。图 4(b) 所示为斜率效率为 76.5% 时的输出激光光谱。其中, 输出激光的中心波长为 1063.02 nm, 与 LR1 保持一致; 半高全宽为 0.057 nm; 由于自相位调制等展宽效应, 该值略大于 LR1 的带宽。

3 结束语

通过在全光纤谐振腔中插入一个简单的光纤珐珀腔, 实现了自脉冲抑制的稳定的连续激光输出。其中, 光纤珐珀腔由一对光纤光栅构成, 在腔内起到了增加光子寿命、稳定谐振纵模和抗环境干扰的作用, 从而限制了自脉冲的产生, 并使噪声抖动降至原先的 1/3。这种简单的

腔结构保持了较高的斜率效率 (76.5%), 实现了高功率的激光输出 (36.5 W)。这种全光纤化的腔结构不仅可以用作高功率稳定的连续激光运转激光器, 而且还可以用作更高功率光纤放大器的种子, 用于限制非线性效应的产生。

参考文献

- [1] Paschotta R, Nilsson J, Tropper A C, et al. Ytterbium-doped Fiber Amplifiers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1997, **33**(7): 1049–1056.
- [2] Tunnermann A, Schreiber T, Roser F, et al. The Renaissance and Bright Future of Fibre Lasers [J]. *Journal of Physics B*, 2005, **38**(9): 681–693.
- [3] Bielawski S, Bouazaoui M, Derozier D, et al. Stabilization and Characterization of Unstable Steady States in a Laser [J]. *Physical Review A*, 1993, **47**(4): 3276.
- [4] Tsang Y H, King T A, Ko D K, et al. Output Dynamics and Stabilisation of a Multi-mode Double-clad Yb-doped Silica Fibre Laser [J]. *Optics Communications*, 2006, **259**(1): 236–241.
- [5] Salhi M, Hideur A, Chartier T, et al. Evidence of Brillouin Scattering in an Ytterbium-doped Double-clad Fiber Laser [J]. *Optics Letters*, 2002, **27**(15): 1294–1296.
- [6] Dawson J W, Messerly M J, Beach R J, et al. Analysis of the Scalability of Diffraction-limited Fiber Lasers and Amplifiers to High Average Power [J]. *Optics Express*, 2008, **16**(17): 13240–13266.
- [7] Brunet F, Taillon Y, Galarneau P, et al. A Simple Model Describing Both Self-mode Locking and Sustained Self-pulsing in Ytterbium-doped Ring Fiber

- Lasers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2005, **23**(6): 2131.
- [8] Guan W, Marcianite J R. Complete Elimination of Self-pulsations in Dual-clad Ytterbium-doped Fiber Lasers at All Pumping Levels [J]. *Optics Letters*, 2009, **34**(6): 815–817.
- [9] Mizrahi V, DiGiovanni D J, Atkins R M, et al. Stable Single-mode Erbium Fiber-grating Laser for Digital Communication [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1993, **11**(12): 2021–2025.
- [10] Chen H, Zhu G, Dutta N K, et al. Suppression of Self-pulsing Behavior in Erbium-doped Fiber Lasers with a Semiconductor Optical Amplifier [J]. *Applied Optics*, 2002, **41**(18): 3511–3516.
- [11] Loh W H, De Sandro J P. Suppression of Self-pulsing Behavior in Erbium-doped Fiber Lasers with Resonant Pumping: Experimental Results [J]. *Optics Letters*, 1996, **21**(18): 1475–1477.
- [12] Hideur A, Chartier T, Ozkul C, et al. Dynamics and Stabilization of a High Power Side-pumped Yb-doped Double-clad Fiber Laser [J]. *Optics Communications*, 2000, **186**(4): 311–317.
- [13] Lee J S, Kim J W. Suppression of Self-pulsing in Yb Fibre Lasers Coupled with External Fabry-Perot Cavity [J]. *Electronics Letters*, 2014, **50**(9): 695–697.

(上接第 11 页)

4 结 论

利用 Zernike 多项式自由曲面替换原离轴光学系统主镜的非球面面形后, 系统性能有了显著提升。从对比结果可以看出, 在离轴三反光学系统中, Zernike 多项式曲面全视场 MTF 值在 50 lp/mm 处均在 0.6 以上, 比常规非球面提升了 15.9% 以上, 像面畸变更小, 系统接近衍射极限。使用 Zernike 多项式表征的面形在离轴光学系统中体现出的矫正像差, 提升成像质量的能力要优于偶次非球面。

参考文献

- [1] Yang H, Zhang Y, Zhang F, et al. Study on Grinding of Free-form Optics Surface in Three-axis CNC Machine[C]. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2014, **9281**(1):105–106.
- [2] 辛迪. 基于 LED 的自由曲面照明光学系统设计 [D]. 中国科学院大学, 2014.
- [3] 刘军. 自由曲面在成像光学系统中的研究 [D]. 中国科学院研究生院 (长春光学精密机械与物理研究所), 2016.
- [4] 孙旭涛. 应用自由曲面的超薄投影显示系统理论和实验研究 [D]. 浙江大学, 2008.
- [5] Zhu J, Hou W, Zhang X D, and et al. Design of a Low F-number Freeform Off-axis Three-mirror System with Rectangular Field-of-view [J]. *J. Opt.*, 2015, **17**(1):015605.
- [6] Saunders I J. Fabrication and Metrology of Freeform Aluminum Mirrors for the SCUBA-2 instrument[C]. *Proceedings of SPIE the International Society for Optical Engineering*, 2005.
- [7] Kim D W, Oh C, Lowman A, et al. Manufacturing of Super-polished Large Aspheric/freeform Optics[C]. *SPIE Astronomical Telescopes and Instrumentation*, 2016:99120F.
- [8] 程颖. 光学自由曲面设计方法及应用研究 [D]. 天津大学, 2013.
- [9] 王淑岩, 单宝忠. Zernike 多项式拟合方法及应用 [J]. *光学精密工程*, 2002, **10**(3):318–323.
- [10] 王超. 自由曲面表征函数及其应用研究 [D]. 中国科学院大学, 2014.