

基于空间滤波的光纤激光被动相位锁定技术研究*

薛宇豪¹⁾²⁾³⁾ 周 军^{1)2)†} 何 兵¹⁾²⁾ 李 震¹⁾²⁾³⁾ 漆云凤¹⁾²⁾ 刘 驰¹⁾²⁾³⁾ 楼祺洪¹⁾²⁾

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)(中国科学院研究生院, 北京 100039)

(2009 年 12 月 30 日收到; 2010 年 1 月 27 日收到修改稿)

基于空间滤波的被动相位锁定, 对掺 Yb 光纤激光阵列的相干组束进行了理论和实验研究. 分析了基于空间滤波光反馈相位锁定的原理, 研究了远场相干光斑 Strehl 比与激光波长及光谱带宽的关系. 建立了二维四路掺 Yb 光纤放大器阵列的被动相位锁定实验系统, 实现了稳定的相干耦合激光输出, 远场光斑 Strehl 比为 0.77. 测得输出激光光谱中单个纵模的带宽约为 9.1 GHz, 与理论计算符合较好.

关键词: 光纤激光, 相干合成, 环形腔

PACC: 4225K, 4255N, 4260

1. 引 言

随着高功率半导体激光技术、特种光纤及其抽运耦合技术的发展, 双包层光纤激光器的输出功率得到了极大提升. 高功率、高光束质量的光纤激光器在许多领域有着广泛的应用, 如高精度激光金属切割、激光焊接、激光与远距离目标的相互作用等等. 但是由于光纤激光中的非线性效应、热效应, 以及材料损伤阈值等的限制, 单路光纤激光器的输出功率受到一定的限制. 通过多路光纤激光进行功率合成, 是提升光纤激光系统输出功率的一种有效方法. 光纤激光的相干合成和光谱合成可以在提高总输出功率的同时, 并保持其良好的光束质量, 是近年来国际上的研究热点. 2009 年, 美国诺格公司利用相干合成技术, 通过光纤激光预放大和介质板条多级放大的方式, 实现了七路高功率激光的相干合成, 总的输出功率达 105 kW^[1]. 2008 年, Sevia 等利用体光栅将五路不同波长的光纤激光进行了光谱合成, 实现了功率大于 750 W 近衍射极限的连续输出^[2].

光纤激光的相干合成技术分为主动相干合成^[3]和被动相干合成两种^[4-6]. 所谓主动相干合成,

就是通过利用反馈控制技术, 快速精确控制从一个种子光源分路放大的各路激光的相位, 来实现各路激光的同相输出. 2006 年, Anderegg 采用这种主动相干合成技术实现了四路二维光纤阵列 470 W 的相干耦合输出^[7]. 但这种系统的结构复杂, 且种子光源必须为单频输出, 各路放大激光也必须为单频、单模、线偏振. 此外, 由于采用了电反馈进行光束的相位控制, 需要较为复杂的控制电路, 响应速度也较慢. 而被动相干合成系统的结构相对简单, 是通过光反馈耦合等技术, 各光纤激光自发实现同相输出, 并不需要窄线宽的种子源和复杂的电子学器件. 目前已经报道的有自组织相位锁定、自成像腔相位锁定等, 由于其是通过光反馈直接实现相位锁定, 结构相对简单, 并且是真正的实时同相. 2005 年, Bruesselbach 等采用自组织结构实现了 10 路光纤阵列的被动相位锁定, 相干合成功率达 200 W^[8]. 2006 年, 我们采用自成像腔结构实现了两个大芯径双包层光纤激光器的相位锁定, 相干输出功率达到 60 W, 并且实现了 4 路 2 维光纤激光的相位锁定^[9-11].

在对自成像腔进行分析的基础上, 通过在空间滤波器处引入反馈信号光纤, 构成了光反馈的环形腔光纤激光的相位锁定. 本文对这种基于空间滤波

* 国家自然科学基金(批准号:60908011, 60907045), 国家高技术研究发展计划(批准号:2008AA03Z405), 上海科技启明星基金(批准号:09QB1401700)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: junzhousd@mail.siom.ac.cn

光反馈的光纤激光被动相位锁定技术进行了理论和实验研究,分析了光反馈相位锁定的原理,建立了二维四路掺 Yb 光纤放大器阵列相干合成系统,实现了稳定的相干耦合激光,并对相干输出激光的光谱特性进行了详细分析.

2. 理论分析

在自成像腔光纤激光被动相位锁定技术中,通过放置于透镜焦平面的空间滤波器进行选模,实现各路光纤激光的相位锁定,如图 1(a),光纤激光的输出在透镜 L_3 的焦平面进行滤波,同相模式的信号光被输出镜反馈,通过光纤激光器的输出端重新返回耦合到光纤激光器中,实现同相模式光的高增益;而异相模式的光则被滤波器滤除,不能返回到

光纤激光器中,异相模式的光存在高损耗,不能形成激光振荡.正是由于空间滤波器的模式选择作用,实现了多路光纤激光的相位锁定.对于自成像腔结构,如果我们在空间滤波器的位置放置一单模光纤,并将其通过光纤分束器后,作为各路光纤激光的种子光源,则同相模式的光就会通过这一单模光纤而被分路并且放大,从而在这种环形腔结构中实现各路激光的相位锁定.环形腔结构被动相位锁定的原理装置如图 1(b)所示,其由 N 路光纤放大器(A)阵列和一个单模反馈光纤(FF)及其光纤分束回路组成.光纤放大器阵列准直输出的激光经过一个分束镜,反射的小部分激光作为反馈信号光通过聚焦透镜耦合进入单模反馈光纤,反馈信号光经过分束器均匀的分成 N 路信号光,再分别进入光纤放大器阵列,从而构成了环形腔结构.

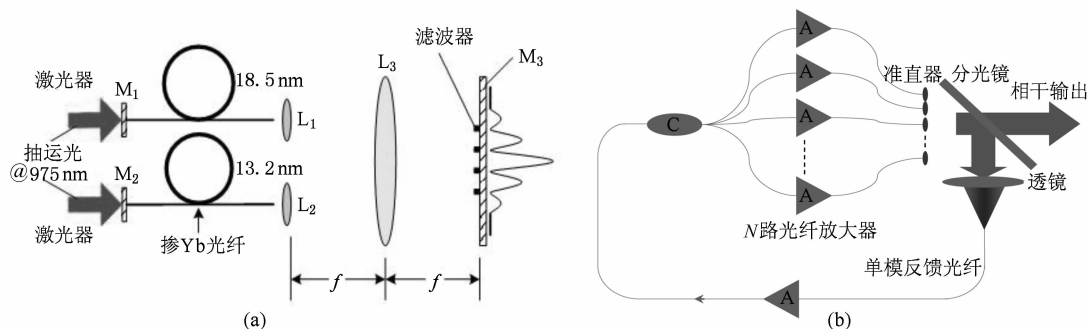


图 1 光纤激光被动相干合成原理图 (a) 自成像腔结构; (b) 环形腔结构

在这种环形腔被动相位锁定系统中,单模反馈光纤其实就是一个空间滤波器,通过调节只让峰值强度较高的同相激光透过滤器而进入单模反馈光纤,并得到功率放大,而其他低峰值强度的异相模式则得到抑制. Strehl 比是用来描述相干激光在远场光斑特性的一个物理量,滤波器处于聚焦透镜的焦平面,滤波器处的光场特性也即为远场特性,因此也可以用 Strehl 比来表示滤波器的透射率. 设每一路光纤放大器输出到达单模反馈光纤的相位为

$$\phi_i = 2\pi f(nL)_i/c,$$

设各路光纤放大器的平均光程为 $(nL)_{\text{avg}}$, 那么它们的相对时间延迟为

$$\tau_i = [(nL)_i - (nL)_{\text{avg}}]/c,$$

相对相位可以表示为 $\phi_i = 2\pi f\tau_i$, 假设每路光纤放大器的放大特性一致,即输出具有相同的振幅强度,则相干耦合光场在单模反馈光纤处的 Strehl 比可以表示为

$$\begin{aligned} S &= \left| \sum_{i=1}^N \exp(i\phi_i) \right| / N^2 \\ &= \left| \sum_{i=1}^N \exp[i2\pi f\tau_i] \right| / N^2, \end{aligned} \quad (1)$$

假设光纤放大器阵列中 N 路光程服从正态分布,

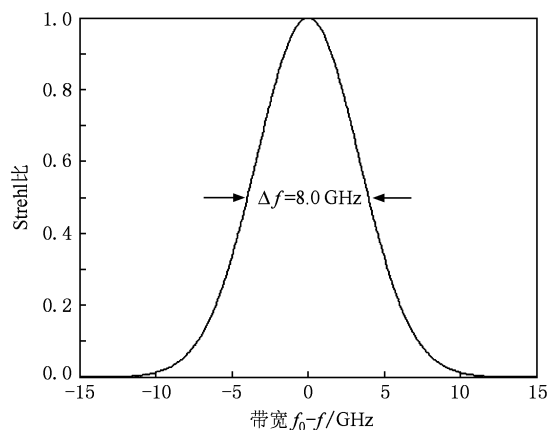


图 2 Strehl 比与带宽 $f - f_0$ 的关系

L_{RMS} 为各路相对光程 $(nL)_i - (nL)_{\text{avg}}$ 的均方根, τ_{RMS} 为各路相对时间延迟 τ_i 的均方根, 在频率为 f_0 时, 到达单模反馈光纤处相位一致, 那么 Strehl 比与频率带宽的关系可以用一个高斯函数表示^[12],

$$S(f - f_0) = \exp[-4\pi^2(f - f_0)^2\tau_{\text{RMS}}^2], \quad (2)$$

在 L_{RMS} 为 1 cm 时, τ_{RMS} 为 33 ps, 计算了 Strehl 比与带宽的关系, 如图 2 所示, 其半高全宽 (FWHM) Δf 为 8.0 GHz. 根据 (2) 式得, 半高全宽 Δf 与相对光程的均方根 L_{RMS} 成反比

$$\Delta f = \frac{\sqrt{\ln 2}c}{\pi} \cdot \frac{1}{L_{\text{RMS}}}. \quad (3)$$

根据 (1) 式, 在 1066—1076 nm 范围内, L_{RMS} 为 1 cm 时, 不同波长下的 Strehl 比如图 3 所示, 其中 (a) 和 (b) 分别为四路和八路光纤放大系统下的计算结果. 可以看出, 图 3(a) 中多个波长的纵模的 Strehl

比达到 0.6, 甚至超过 0.8, 很容易实现高 Strehl 比输出, 随着光纤数量 N 的增大, 如图 3(b) 中只有几个波长的纵模的 Strehl 比可以达到 0.6 以上, 可以获得较高 Strehl 比的纵模数量有所减少.

由于外界振动和热效应的影响, 每一路光纤放大器的光程 (nL) 会发生变化, 输出相位也在随时间无规则变化. 在这种系统中, 因为是光反馈的方式, 响应速度极快, 在很短的时间内仍然可以认为各路放大器的光程是不变的, 即每一路的输出相位是不变的. 由于掺 Yb 光纤的增益带宽较宽, 总是有一些波长的纵模在单模反馈光纤处可以获得高的 Strehl 比, 从而可以耦合到单模反馈光纤中, 作为反馈信号光而得到放大输出, 实现同相输出. 因此该系统实质是由于单模反馈光纤的滤波作用, 通过不同波长纵模的自主选择来实现相位锁定的.

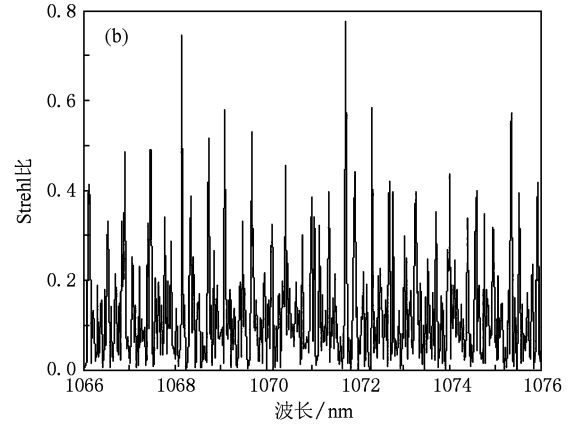
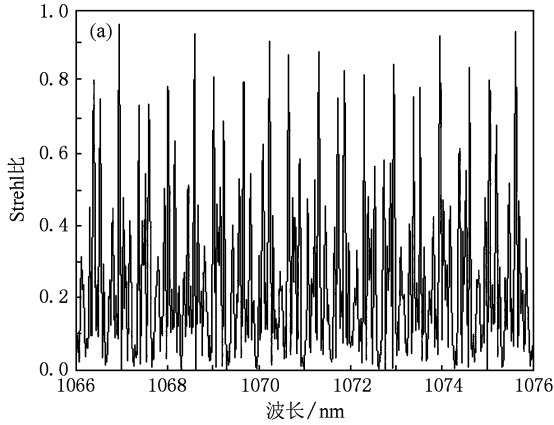


图3 Strehl 比与波长的关系 (a) 四路光纤放大系统; (b) 八路光纤放大系统

3. 实验装置

如图 4 为二维四路光纤激光环形腔相位锁定的实验装置, 其由参考光 1064 nm 半导体激光器, 四路掺 Yb 单频保偏光纤放大器和单模反馈光纤放大回路组成, 单模反馈光纤通过三个 50:50 的光纤分束器, 同保偏光纤放大器的种子输出端熔接在一起, 构成环形腔结构. 波长为 1064 nm 半导体激光器 (LD) 仅作为参考光用于实验中的光路调试, 其与单模反馈光纤 (FF) 经过一个 50:50 的合束器后耦合入到各路光纤放大器中. 光纤放大器 (A) 为我们自行研制的掺 Yb 单频保偏光纤放大器, 抽运源为 975 nm 波长的半导体激光器, 双包层单模保偏放大光纤 (YDF) 的纤芯直径 6 μm , 内包层直径 125 μm , 在放大器输出端与保偏隔离器连接, 防止激光反向传

输. 四路光纤放大器的输出经过准直器 (Co) 准直, 近场光斑直径为 3.4 mm, 排列为正方形, 光斑间距 9 mm. 分光镜 (BS1) 反射的 10% 的光经过聚焦透镜 L_1 耦合入反馈光纤中, 利用一个 1:99 的分束器使得 99% 的能量进入回路放大器, 作为信号光再次进入四路放大器阵列, 1% 的输出用来进行功率监测. 经过 BS1 透射的 90% 的能量作为相干耦合输出. 分光镜 (BS2) 反射 4% 的光通过傅里叶透镜 L_2 在焦点处实现相干叠加, 利用 CCD (型号 SP620U) 和 SpiriconInc 公司生产的 LBA-USB-SP 激光光束分析仪来记录干涉图样以及分析数据.

4. 结果与讨论

利用图 4 中的实验装置, 通过精密调节, 实现了二维四路光纤放大器阵列被动相位锁定, 获得了稳

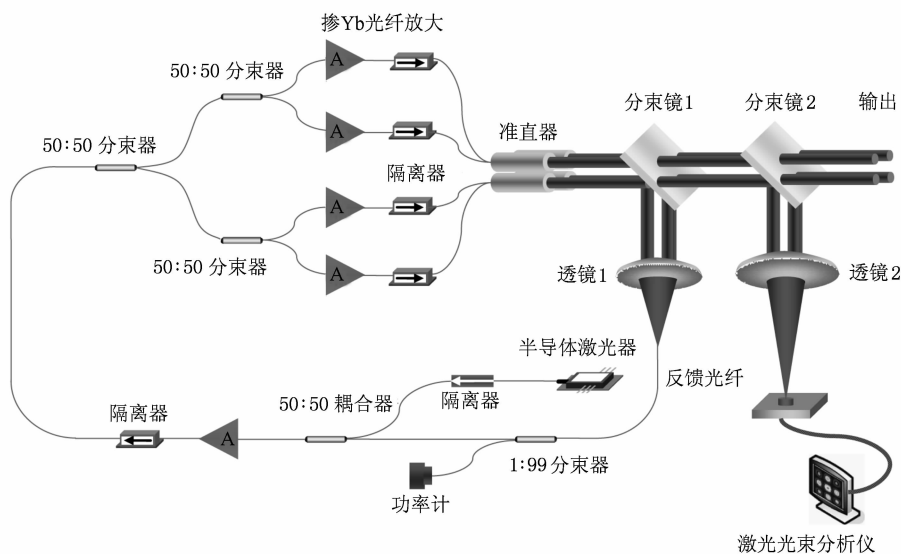


图4 二维四路掺Yb光纤放大器相干组束实验装置图

定的相干耦合激光输出,图5为实验获得的远场干涉图样,为典型的二维相干光束的远场干涉图样.其Strehl比为0.77,中央主瓣的大小 $61\mu\text{m}$,其占光斑总能量的18.8%.我们知道,光束阵列占空比是影响相干组束系统远场光斑分布的重要因素之一,通过缩小光束间距(也即提高光束阵列的占空比),将会使得中央主瓣的能量更集中.在四路光纤放大器全功率运转下,测得的相干耦合输出功率为2.97 W.由于光反馈的响应速度快,外界对相干合成的影响非常小,远场干涉图样十分稳定,当各路光纤放大器的光程受外界影响而改变时,该系统能自动快速的选择其他纵模来实现高Strehl比的相干耦合输出,干涉图样和输出功率没有任何变化,相位锁定状态保持不变.

图6为系统相位锁定时测量的输出光谱,可见相干耦合激光波长在1066—1076 nm较宽的光谱范

围内随机变化,且是由多个波长的纵模组成,单个纵模的3 dB带宽约为0.03 nm(9.1 GHz),与我们理论计算的基本一致.由于我们采用的光谱仪最小分辨率为0.02 nm,实际中各路光纤放大器的光程差可能会大于1 cm,根据式3可知,单个纵模带宽与各路相对光程 L_{RMS} 成反比,所以我们测量的纵模3 dB带宽应该小于0.03 nm.由于外界振动和热效应等的影响,各路光纤放大器到达单模反馈光纤的相位会发生变化,系统将选择其他波长的纵模来实现相位锁定,所以我们观察到的光谱是在随时、随机变化的,但是系统的输出功率和干涉图样都是十分稳定的.由于在系统中没有使用任何带宽限制器件,而掺Yb光纤的增益带宽较宽,整个输出光谱带宽有10 nm,若在反馈光纤回路中加入窄带滤波器,可有效压缩输出激光光谱的带宽.

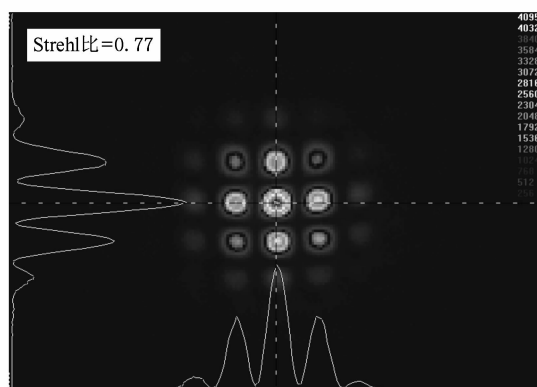


图5 二维四路光纤放大器的干涉图样

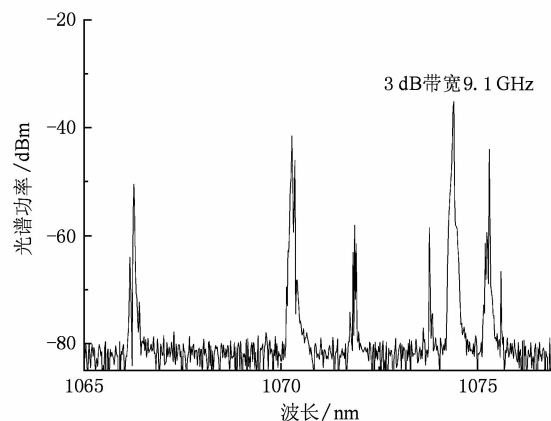


图6 相位锁定时测量的组束输出光谱

5. 结 论

理论分析和实验研究表明, 基于空间滤波的被动相位锁定技术是利用单模反馈光纤作为滤波器, 通过选择具有高 Strehl 比的不同频率的纵模来实现相位锁定的. 利用该技术我们实现了二维四路掺 Yb 光纤放大器阵列的相干组束, 获得了稳定的干涉图样, 其 Strehl 比为 0.77, 输出激光波长在 1066—

1076 nm 较宽的光谱范围内随机变化, 且是由多个波长的纵模组成, 单个纵模的带宽与理论计算相符合. 该方法结构简单, 不需要任何相位控制元件, 采用了光反馈的形式, 反应速度极快, 受外界影响小, 可以实现稳定的相位锁定. 由于各个光纤放大器采用了 MOPA 结构, 具有良好的扩展性, 在各路放大器后再接入一级高功率放大器, 并增加组束的放大器路数, 有望获得更高功率的相干耦合输出.

-
- [1] McNaught S J, Komine H, Weiss S B, Simpson R, Johnson A M, Machan J, Asman C P, Weber M, Jones G C, Valley M M, Jankevics A, Burchman D, McClellan M, Sollee J, Marmo J, Injeyan H 2009 *Conference on Lasers and Electro-Optics* Baltimore, USA, May 31, 2009 CThA1
 - [2] Sevia A, Andrusyak O, Ciapurin I, Smirnov V, Venus G, Glebov L 2008 *Optics Letters* **33** 384
 - [3] Zhou P, Liu Z J, Wang X L, Ma Y X, Ma H T, Xu X J 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 231106-1
 - [4] Wang J M, Duan K L, Wang Y S 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5627 (in Chinese) [王建国、段开棕、王屹山 2008 物理学报 **57** 5627]
 - [5] Lei B, Feng Y, Liu Z J 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6419 (in Chinese) [雷兵、冯莹、刘泽金 2008 物理学报 **57** 6419]
 - [6] Chen Z L, Hou J, Zhou P, Liu L, Jiang Z F 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 7046 (in Chinese) [陈子伦、侯静、周朴、刘亮、姜宗福 2007 物理学报 **56** 7046]
 - [7] Anderegg J, Brosnan S, Cheung E, Epp P, Hammons D, Komine H, Weber M, Wickham M 2006 *Proc. SPIE* San Jose, USA, January 23, 2006 61020U-1
 - [8] Bruesselbach H, Minden M, Rogers J L, Jones D C, Mangir M S 2005 *Conference on Lasers and Electro-Optics* Baltimore, America, May 22, 2005 CMDD4
 - [9] He B, Lou Q H, Zhou J, Dong J X, Wei Y R, Wang Z J 2006 *Acta Optica Sinica* **26** 1279 (in Chinese) [何兵、楼祺洪、周军、董景星、魏运荣、王之江 2006 光学学报 **26** 1279]
 - [10] He B, Lou Q H, Zhou J, Dong J X, Wei Y R, Xue D, Qi Y F, Su Z P, Li L B, Zhang F P 2006 *Optics Express* **14** 2721
 - [11] He B, Lou Q H, Wang W, Zhou J, Zheng Y H, Dong J X, Wei Y R, Chen W B 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 251115-1
 - [12] Rothenberg J E 2008 *Proc. SPIE* San Jose, USA, January 21, 2008 687315-1

Passive phase locking of fiber laser based on spatial filtering^{*}

Xue Yu-Hao¹⁾²⁾³⁾ Zhou Jun^{1)2)†} He Bing¹⁾²⁾³⁾ Li Zhen¹⁾²⁾³⁾ Qi Yun-Feng¹⁾²⁾

Liu Chi¹⁾²⁾³⁾ Lou Qi-Hong¹⁾²⁾

1) (*Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China*)

2) (*Shanghai Key Laboratory of All solid-state Laser and Applied Techniques, Shanghai 201800, China*)

3) (*Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

(Received 30 December 2009; revised manuscript received 27 January 2010)

Abstract

Coherent beam combination of Yb-doped fiber laser array is studied theoretically and experimentally by spatial filtering to passive phase locking. The principle of optical feedback phase locking based on spatial filtering is analyzed, and the relations of Strehl ratio in far field to wavelength and spectrum bandwidth are studied. The coherent beam combination of four Yb-doped fiber amplifier array is achieved experimentally, and stable interference pattern is obtained. The Strehl ratio in far field is 0.77. In the output spectrum, the bandwidth of single longitudinal mode is about 9.1 GHz consistent with the theoretical calculation.

Keywords: fiber laser, coherent beam combination, ring cavity

PACC: 4225K, 4255N, 4260

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60908011, 60907045), the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2008AA03Z405), the Shanghai “Phosphor” Science Foundation, China (Grant No. 09QB1401700).

[†] Corresponding author. E-mail: junzhousd@mail.siom.ac.cn