

三路 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺光纤激光器的 外腔谱组束实验研究

吴卓亮 赵尚弘 楚兴春 张迪 占生宝 石磊 马丽华

(空军工程大学电讯工程学院, 陕西 西安 710077)

摘要 采用激光二极管作为抽运源、大模面积 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺双包层光纤作为增益介质, 利用闪耀光栅、傅里叶变换透镜和输出耦合镜构成外腔, 进行了光纤激光器的外腔谱组束实验研究。在外腔作用下, 单个光纤激光器可在 38 nm 波长范围内实现调谐输出, 线宽小于 0.08 nm。实现了三路光纤激光器的外腔谱组束, 组束功率为 940 mW, 相应的组束效率为 74.3%; 水平方向光束质量因子 $M_x^2 = 1.320$, 与单束激光输出 ($M_x^2 = 1.204$) 相比略微增大; 当换用较长焦距的傅里叶变换透镜时, 系统组束潜力增大且光束质量得到改善。

关键词 激光器; 谱组束; $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺光纤; 外腔; 闪耀光栅

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201131.0214001

Experimental Research on External Cavity-Based Spectral Beam Combining of Three- $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ Codoped Fiber Lasers

Wu Zhuoliang Zhao Shanghong Chu Xingchun Zhang Di
Zhan Shengbao Shi Lei Ma Lihua

(Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710077, China)

Abstract The external cavity-based spectral beam combining of $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ codoped fiber lasers is studied experimentally by using laser diodes as pump sources and large-mode-area $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ codoped double-clad fiber lasers as the gain media. The external cavity is composed of a blazed grating, a Fourier transform lens and an output coupling mirror. With the external cavity, single fiber laser can produce wavelength-tunable output. The tunable range is 38 nm and the linewidth is less than 0.08 nm. Spectral beam combining of three fiber lasers is performed. The combined output power is 940 mW with the combining efficiency of 74.3%. The output beam profile is stable with good beam quality and the beam quality factor M_x^2 in the horizontal direction is 1.320, slightly higher than that of individual laser output which is 1.204. When using Fourier transform lens with longer focal length, the combining potential of the system can be increased and the beam quality can be improved.

Key words lasers; spectral beam combining; $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped fiber; external cavity; blazed grating

OCIS codes 140.3298; 140.3480; 140.3510

1 引 言

$\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺光纤激光器是 1550 nm 波段的理想光源, 在光通信、光传感、激光医疗及光谱分析等领域具有广阔的应用前景, 近年来引起了人们的

广泛关注^[1~5]。随着包层抽运技术的进步以及大模面积双包层光纤的出现, $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺光纤激光器的功率得到很大提高^[6,7]。但是, 由于 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺双包层光纤自身的斜效率较低, 一般约为

收稿日期: 2010-06-24; 收到修改稿日期: 2010-09-19

基金项目: 国家自然科学基金(60678018)资助课题。

作者简介: 吴卓亮(1983—), 男, 博士研究生, 主要从事光纤激光器和激光组束等方面的研究。

E-mail: wzliang@163.com

导师简介: 赵尚弘(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光通信与激光技术等方面的研究。

E-mail: zhaoshangh@yahoo.com.cn

40%，再加上高功率条件下光纤中的非线性效应和光学损伤等因素影响，单路 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺光纤激光器的输出功率受到极大限制，而且光束质量也随着输出功率的增大而变差。

激光组束技术被认为是能够突破单根光纤功率限制从而获得高功率、高亮度光纤激光输出的有效手段，主要分为相干组束和谱组束两种类型^[8~10]。相干组束通过对各阵元的相位锁定实现相干叠加输出，能够获得单一频率的激光输出，但输出光斑包含多个旁瓣，不仅影响实际效率，还会造成组束光束质量的下降；此外，相干组束要求对波长和相位进行精确控制，随着阵元数量的增加，系统复杂程度和实现难度将增大^[11~15]。谱组束通过色散元件实现多个不同波长阵元输出的空间叠加，不仅结构简单、控制方便，还能够保持与单根光纤输出一致的光束质量，近年来备受关注，成为激光器领域的研究热点。国外许多研究人员先后利用激光二极管^[16,17]、掺 Yb^{3+} 光纤激光器^[18~22] 等验证了谱组束的可行性，并获得了很好的组束效果。然而，到目前为止，针对 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺光纤激光器的谱组束实验报道甚少，而国内对谱组束技术的研究则主要集中在理论方面的探索^[23~25]。之前曾报道了两路 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺光纤激光器谱组束的初步结果，但没有对组束激光光束质量进行测量和分析^[26]。

本文报道了采用大模面积 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺双包层光纤作为增益介质进行三路光纤激光器外腔谱组束的实验结果。实验中采用闪耀光栅、傅里叶变换

透镜和输出耦合镜构成外腔，获得了 940 mW 的组束激光，组束效率分别达到 74.3%，水平方向光束质量因子 $M_x^2=1.320$ 。此外，通过增大透镜焦距的方式提高了系统的组束潜力并改善了输出光束质量。

2 实验装置和工作原理

图 1 所示为三路光纤激光器外腔谱组束的实验装置图。抽运源为中心波长为 976 nm 的激光二极管。抽运光通过由非球面透镜和显微物镜组成的耦合系统进入光纤。所用光纤为美国 Nufern 公司生产的大模面积 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺双包层光纤 (LMA-EYDF-25/300)，内包层直径为 300 μm ，数值孔径为 0.46，纤芯直径为 25 μm ，数值孔径为 0.1，三根光纤长度分别为 5.6, 7.2 和 8.1 m。激光谐振腔由光纤前端的二色镜和光路末端的输出耦合镜构成，二色镜对抽运光的透射率约为 98%，对信号光的反射率约为 95%。光纤的后端面切成斜面以抑制光纤后端面的菲涅耳反射。光纤输出光经过焦距为 50 mm 的傅里叶变换透镜准直以后入射到光栅上，所用光栅为定制的闪耀光栅，线密度为 400 l/mm，对 1500~1600 nm 范围内垂直入射的非偏振光具有 69% 的衍射效率。经光栅衍射后的光入射到输出耦合镜上，输出耦合镜对 1550 nm 波段的光具有 5% 的反射率，用以提供反馈形成振荡并实现激光的耦合输出。

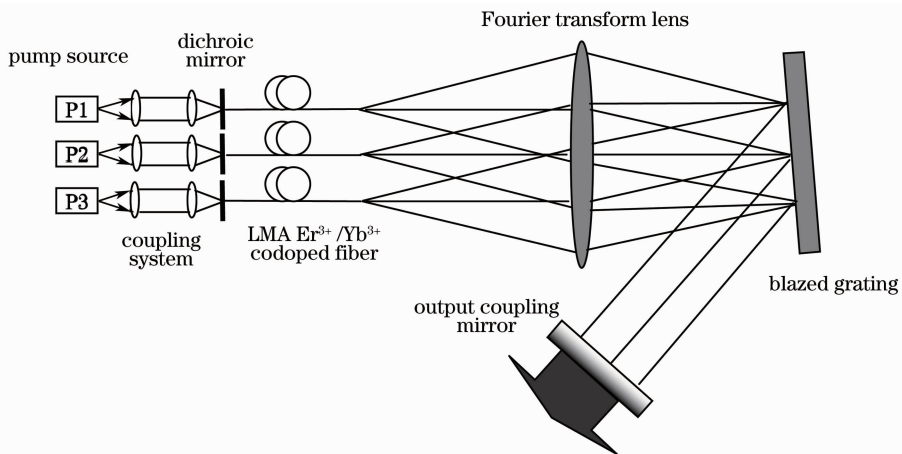


图 1 三路光纤激光器外腔谱组束实验装置图

Fig. 1 Experimental setup for external cavity-based spectral beam combination of three fiber lasers

在激光输出端利用 Anritsu 公司生产的光谱仪 (MS9710B) 观察激光光谱，光谱仪的最小分辨率为 0.07 nm，利用 Spectra-Physic 公司生产的功率计

(407A) 测量功率，输出激光的光斑则利用 Thorlabs 公司生产的光束分析仪 (BP109 IR) 进行观察和分析。

实验系统中, 光纤输出端和闪耀光栅分别位于透镜的前后两个焦平面处, 在透镜作用下, 各阵元输出光束按特定角度入射到闪耀光栅上的同一位置, 入射角度由阵元位置决定:

$$\alpha_n - \alpha_0 \approx \frac{x_n}{f}, \quad (1)$$

式中 α_n 代表任意阵元在光栅上的入射角, α_0 代表系统轴上的阵元在光栅上的入射角, x_n 代表阵元与系统轴之间的横向距离, f 代表透镜焦距。

经光栅衍射以后, 只有沿输出耦合镜法线方向传输的光束能够沿原路返回进入光纤形成激光振荡, 假设输出耦合镜与闪耀光栅之间夹角为 β , 即各阵元产生的激光在光栅上共同的衍射角为 β 。根据光栅方程得到

$$\sin \beta - \sin \alpha_n = \frac{m\lambda_n}{d}, \quad (2)$$

式中 m 代表衍射级次(取为 1), λ_n 代表阵元的振荡波长, d 代表光栅常数。

由此得到阵元的振荡波长 λ_n 与阵元位置之间的关系式:

$$\lambda_n - \lambda_0 = \frac{d\lambda}{dx} x_n \approx \frac{dx_n \cos \alpha_n}{f}. \quad (3)$$

可见, 在由透镜、闪耀光栅和输出耦合镜构成的外腔的共同作用下, 不同位置的阵元将在特定波长处实现激光振荡, 且各阵元输出激光均沿输出耦合镜法线方向传输, 实现激光束的同向传输和功率叠加。阵列总的频谱范围 $\Delta\lambda_{\text{array}}$ 与阵列尺寸 W 的关系为

$$W = \frac{\Delta\lambda_{\text{array}} f}{d \cos \alpha_0}. \quad (4)$$

阵列总的频谱范围由增益介质本身的特性决定。因此, 通过增大透镜焦距 f 、中心光线入射角 α_0 或者减小光栅常数 d , 都可以增大 W 值, 从而在阵元间距确定的情况下也就增大了允许组束的阵元数, 提高了系统的组束潜力。

光束通过光栅进行衍射的过程中, 激光线宽 $\Delta\lambda$ 会造成光束发散角的增大, 进而造成光束质量的下降。由激光线宽引入的发散角增量可表示为^[20]

$$\theta_B = \frac{\Delta\lambda}{d \cos \beta}, \quad (5)$$

外腔中的激光线宽由外腔系统的色散能力决定

$$\Delta\lambda = \frac{Ad \cos \alpha_n}{f}, \quad (6)$$

式中 A 代表光纤模场直径。

可见, 通过增大透镜焦距、减小光栅常数的方法

均能够减小外腔中的激光线宽, 进而改善外腔谱组束激光的光束质量。

3 实验结果与讨论

3.1 单路光纤激光器实验

单独打开抽运源 P1, 调整光路使激光输出达到最大, 测得输出功率为 470 mW (另外两路光纤激光器的最大输出功率分别为 410 mW 和 385 mW), 输出激光中心波长位于 1543.45 nm, 线宽为 0.072 nm, 其光谱如图 2 所示。尽管所用光纤为大模面积的多模光纤, 但在外腔的选频作用下, 系统获得了窄线宽的光纤激光输出。由于组束系统的增益带宽有限, 因而单阵元线宽的减小是实现多阵元谱组束的有利条件。图 3 所示为输出功率随入射抽运功率的变化曲线, 计算的斜效率约为 23.9%, 低于厂家的标称斜效率(35%)。斜效率较低的原因主要包括: 1) 光纤的后端面进行了斜切, 但没有经过专业抛光处理, 表面平整度较差; 2) 光纤长度没有经过优化; 3) 受光栅衍射效率的限制。

此时的远场光斑如图 3 插入部分所示, 输出光

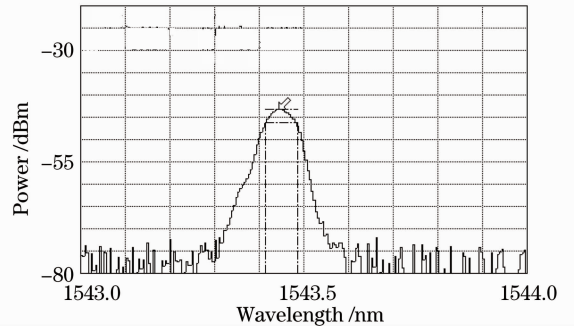


图 2 波长 1543.45 nm 处的光谱图

Fig. 2 Optical spectrum at 1543.45 nm

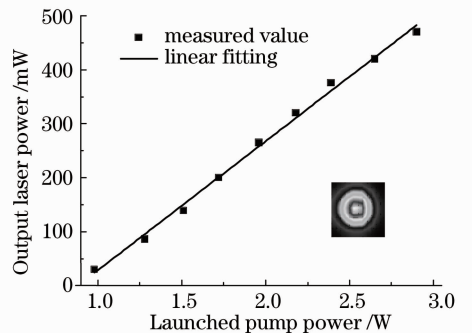


图 3 波长 1543.45 nm 处的斜效率曲线及光斑形状(插入部分)

Fig. 3 Curve for slope efficiency at 1544.45 nm and the beam profile (insert)

斑十分稳定,这主要得益于系统的外腔部分对振荡波长的自动控制能力。一旦外部干扰(机械振动、温度变化等)导致光路发生微小变化,外腔的反馈条件将随之改变,保证系统具有稳定的输出。测得的光束质量因子 $M_x^2=1.204$, $M_y^2=1.152$ (如图4所示),水平方向的 M_x^2 值略大,主要原因是光栅的色散作用导致衍射后的光束发生了展宽,造成光束质量下降。

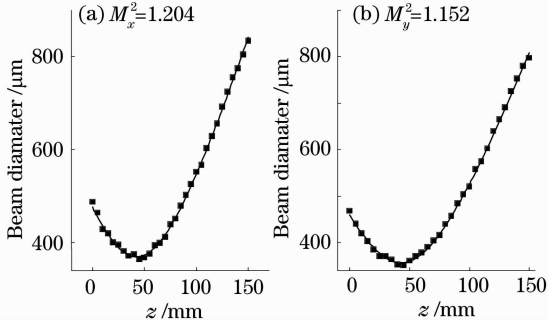


图4 光斑直径随轴向位置 z 的变化曲线

Fig. 4 Beam radius versus axial position z

Cook 在文献[16]中指出,光纤激光器外腔谱组束可通过对光纤的平移进行演示和验证。旋转光纤调节架的横向调整旋钮,沿水平方向平移光纤,通过光谱分析仪可观察到不同波长的激光输出,测得的功率也发生变化,激光中心波长和输出功率随位移的变化曲线如图5所示,位移量根据旋钮旋转圈数计算。激光器在不同波长下均获得了稳定的单模激光输出,线宽均小于 0.08 nm ,波长调谐范围可达到 38 nm 。值得注意的是,在激光器的波长调谐过程中,激光输出方向始终沿输出耦合镜法线方向不变,这意味着只需在特定位置放置光纤阵元,多个阵元即可在相应波长下产生激光振荡,并沿同一方向叠加输出,实现谱组束。

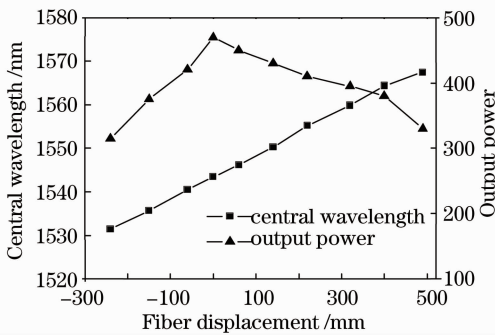


图5 中心波长和输出功率随光纤位移的变化曲线

Fig. 5 Central wavelength and output power versus displacement of fiber

3.2 组束实验

同时打开三个抽运源,调节输出耦合镜的角度,

当外腔能够同时给三路光纤激光器提供足够的反馈时,从输出耦合镜输出的三个光斑逐渐靠近并最终合成为一个光斑,实现了三路光纤激光器输出的非相干叠加。测得组束功率为 940 mW ,计算得到组束效率(定义为组束功率与各阵元单独工作时的最大输出功率之和的比值)约为 74.3% 。

组束光谱如图6(d)所示,在外腔作用下,三个光纤激光器均按照外腔确定的波长工作,组束输出光谱具有稳定的三个峰值,相邻峰值波长之间的间隔约为 15.1 nm 。实验系统中光纤前端剥去外包层并紧密排列,因而阵元间隔为 $300 \mu\text{m}$,根据(3)式计算得到相邻阵元的波长间隔为 15 nm 。实验结果与理论计算值基本一致,存在误差的主要原因在于光纤没有完全平行排列,造成出光方向具有一定的偏差,因此波长间隔不能够完全满足理论公式。

依次单独打开各阵元,获得的激光输出光谱分别如图6(a)~(c)所示,中心波长依次为 1536.1 , 1551.1 和 1566 nm ,与组束光谱中的三个峰值一一对应,相应的输出功率依次为 380 , 326 和 234 mW 。对于这种非相干组束系统,每个阵元都是相对独立的光纤激光器系统,因而个别阵元的增加对其它阵元没有直接影响,这也正是非相干组束方案的主要优点之一。

此时组束系统的总带宽达到 30.2 nm ,按此计算,再增加一个阵元则系统带宽将超过图5所示的调谐范围。为提高系统组束潜力,必须减小阵元之间的波长间隔。由(3)式可知,增大透镜焦距或减小光栅常数均能达到此效果。因此,实验中换用焦距为 100 mm 的傅里叶变换透镜,得到的组束光谱如图7所示。此时输出光谱中相邻谱线之间的间隔减小到了约 7.5 nm ,而总带宽则为 14.8 nm ,组束潜力增大一倍,组束功率为 952 mW 。

图8给出了采用不同焦距的透镜时,组束激光的光斑图样及水平方向光束质量测量曲线。透镜焦距为 50 mm 时,水平方向光束质量因子为 $M_x^2=1.320$ 。与组束前单个阵元的输出相比,水平方向的 M_x^2 因子略微增大,一方面是由于光栅色散的作用;另外,由于输出耦合镜反射率较低,组束后两个阵元没有同时实现最佳的反馈效果,造成远场光斑在水平方向没有完全重叠。透镜焦距为 100 mm 时,水平方向光束质量因子为 $M_x^2=1.308$ 。这表明长焦距透镜的使用则在一定程度上改善了光束质量,这是因为透镜焦距的增大提高了外腔系统的色散能力,从而减小了阵元线宽的缘故。

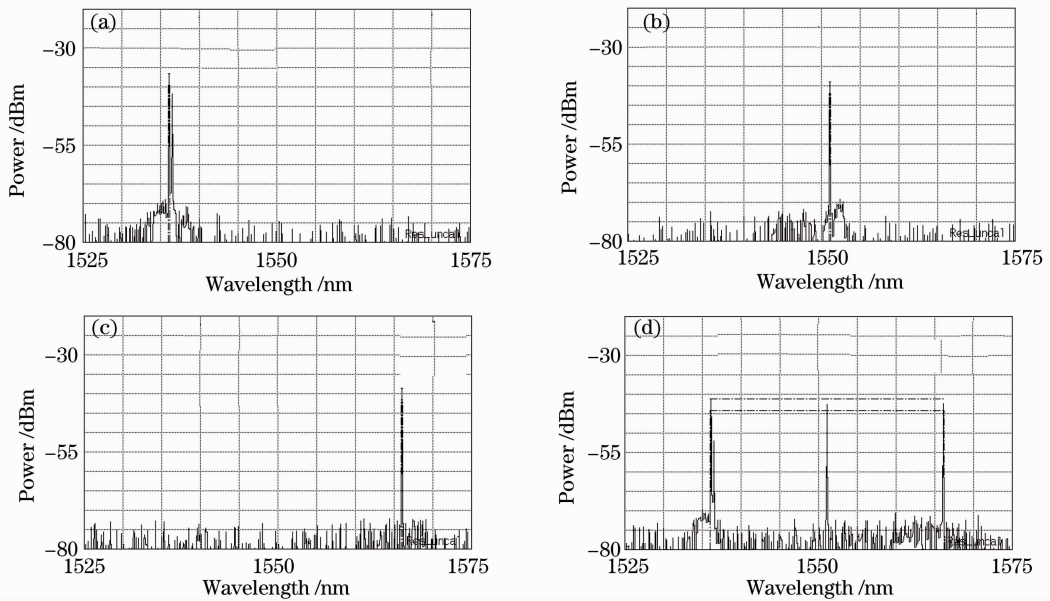


图 6 三路光纤激光器组束输出光谱图。(a) 5.6 m, (b) 7.0 m, (c) 8.2 m, (d) 组束光谱
Fig. 6 Optical spectra for beam combination of three fiber lasers. (a) 5.6 m, (b) 7.0 m, (c) 8.2 m, (d) spectrum for combined beam

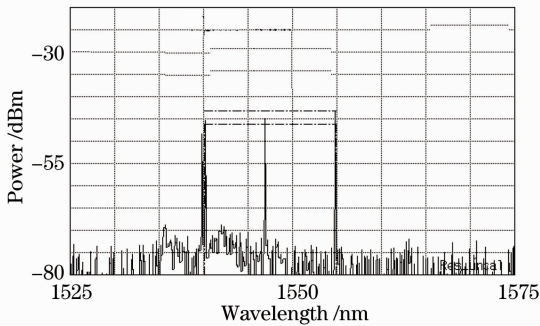


图 7 透镜焦距为 100 mm 时三路光纤激光器组束光谱
Fig. 7 Optical spectrum of three-fiber laser-combined beam for the lens of 100 mm focal length

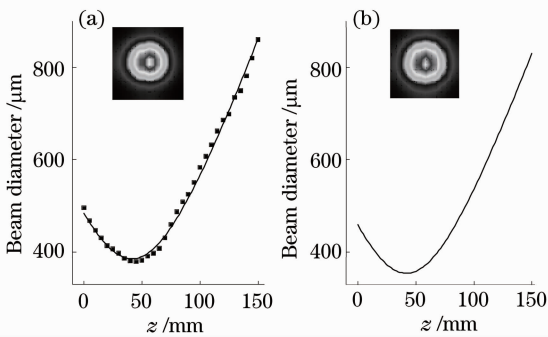


图 8 焦距分别为(a)50 mm 和(b)100 mm 时三路组束光斑及 x 方向光束半径随轴向位置 z 的变化曲线
Fig. 8 Three-fiber laser-combined beam profile and the radius versus axial position z with the lens of focal length (a) 50 mm and (b) 100 mm

4 结 论

采用激光二极管作为抽运源、大模面积 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺双包层光纤作为增益介质,利用闪耀光栅、傅里叶变换透镜和输出耦合镜构成的外腔系统实现了三路 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺光纤激光器的谱叠加输出。在外腔作用下,三路光纤激光器单独工作时均可实现线宽小于 0.08 nm 的波长可调谐输出,最大输出功率依次为 470, 410 和 385 mW。三路光纤激光器组束的输出功率为 940 mW,相应的组束效率为 74.3%;实验获得的组束输出光斑稳定,且保持了较好的光束质量,透镜焦距为 50 mm 和 100 mm 时,组束激光水平方向光束质量因子分别为 $M_x^2 = 1.320$ 和 $M_x^2 = 1.308$ 。

参 考 文 献

- 1 M. Laroche, S. Girard, J. K. Sahu *et al.*. Accurate efficiency evaluation of energy-transfer processes in phosphosilicate $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ -codoped fibers[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2006, **23**(2): 195~202
- 2 Pei Xin, Xiang Wanghua, Tan Li *et al.*. Effect of Yb:Er codoping on suppressing self-pulsing in Er-doped fiber laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(1): 94~98
- 3 裴新, 向望华, 谭莉等. Yb:Er 共掺杂对掺铒光纤激光器中自脉冲行为的抑制作用[J]. *光学学报*, 2004, **24**(1): 94~98
- 4 Wang Tianshu, Guo Yubin, Li Jun *et al.*. All-fiber type short cavity Er/Yb co-doped fiber laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(10): 1161~1164
- 5 王天枢, 郭玉彬, 李军等. 全光纤型 Er/Yb 共掺光纤短腔激光器[J]. *中国激光*, 2004, **31**(10): 1161~1164
- 6 Wu Zhuoliang, Zhao Shanghong, Chu Xingchun *et al.*. Tunable $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped fiber laser based on blazed grating[J].

- Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1352~1355
- 吴卓亮, 赵尚弘, 楚兴春等. 基于闪耀光栅的可调谐 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺光纤激光器[J]. 中国激光, 2009, **36**(6): 1352~1355
- 5 Ren Fang, Xiang Wanghua, Zu Peng, Bai Yangbo *et al.*. Experimental study on Er/Yb Co-doped double-clad all fiber laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 622~626
- 任芳, 向望华, 祖鹏等. Er/Yb 共掺双包层全光纤激光器的实验研究[J]. 中国激光, 2010, **37**(3): 622~626
- 6 J. K. Sahu, Y. Jeong, D. J. Richardson *et al.*. A 103 W erbium-ytterbium co-doped large-core fiber laser [J]. *Opt. Commun.*, 2003, **227**(1-3): 159~163
- 7 Y. Jeong, S. Yoo, C. A. Codemard *et al.*. Erbium; ytterbium codoped large-core fiber laser with 297-W continuous-wave output power[J]. *IEEE J. Selected Topics in Quant. Electron.*, 2007, **13**(3): 573~579
- 8 Zhou Pu, Hou Jing, Chen Zilun *et al.*. Comparison for coherent combining and spectrum combining of fiber lasers [J]. *Laser Technology*, 2008, **32**(4): 413~416
- 周朴, 侯静, 陈子伦等. 光纤激光相干合成与谱合成的比较[J]. 激光技术, 2008, **32**(4): 413~416
- 9 T. Y. Fan. Laser beam combining for high-power, high-radiance sources[J]. *IEEE J. Selected Topics in Quant. Electron.*, 2005, **11**(3): 567~577
- 10 J. Limpert, F. Röser, S. Klingebiel *et al.*. The rising power of fiber lasers and amplifiers [J]. *IEEE J. Selected Topics in Quant. Electron.*, 2007, **13**(3): 537~545
- 11 J. Anderegg, S. Brosnan, E. Cheung *et al.*. Coherently coupled high power fiber arrays[C]. *SPIE*, **6102**: 61020U
- 12 T. M. Shay, J. T. Baker, A. D. Sanchez *et al.*. High power phase locking of a fiber amplifier array[C]. *SPIE*, **7195**: 71951
- 13 He Bing, Lou Qihong, Zhou Jun *et al.*. Phase-locking and high coherent power output of two fiber lasers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(9): 1153~1158
- 何兵, 楼祺洪, 周军等. 两个光纤激光器的相位锁定及高相干功率输出[J]. 中国激光, 2006, **33**(9): 1153~1158
- 14 Cao Jianqiu, Lu Qisheng, Houjing *et al.*. Influence of combining errors in the system for coherent combining of fiber lasers on the far field of output[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3): 351~358
- 曹涧秋, 陆启生, 侯静. 光纤激光器相干合成系统中组束误差对远场光场的影响[J]. 中国激光, 2008, **35**(3): 351~358
- 15 Wang Wei, Lou Qihong, He Bing *et al.*. Effects of space duty cycle on the characteristics of fiber laser coherent beam combination[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(5): 490~492
- 16 V. Daneu, A. Sanchez, T. Y. Fan. Spectral beam combining of a broad-stripe diode laser array in an external cavity[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(6): 405~407
- 17 J. T. Gopinath, B. Chann, T. Y. Fan. 1450-nm high-brightness wavelength-beam combined diode laser array[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(13): 9405~9410
- 18 C. C. Cook, T. Y. Fan. Spectral beam combining of Yb-doped fiber lasers in an external cavity [J]. *OSA Trends in Optics and Photonics*, 1999, **26**: 163~166
- 19 S. J. Augst, A. k. Goyal, R. L. Aggarwal *et al.*. Wavelength beam combining of ytterbium fiber lasers [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(5): 331~333
- 20 A. Liu, R. Mead, T. Vatter *et al.*. Spectral beam combining of high power fiber lasers [C]. *SPIE*, 2004, **5335**: 81~88
- 21 T. H. Loftus, A. M. Thomas, P. R. Hoffman *et al.*. Spectrally beam-combined fiber lasers for high-average-power applications[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 2007, **13**(3): 487~497
- 22 T. Schreiber, C. Wirth, O. Schmidt *et al.*. Incoherent beam combining of continuous-wave and pulsed Yb-doped fiber amplifiers[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 2009, **15**(2): 354~360
- 23 Pan Leilei, Zhang Bin, Yin Suqin *et al.*. Analysis of the beam characteristics and the propagation model of spectral combining systems for Yb-doped fiber lasers [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(12): 8289~8296
- 潘雷雷, 张彬, 阴素芹等. 掺 Yb 光纤激光器阵列谱合成系统的光束传输模型及光束特性分析[J]. 物理学报, 2009, **58**(12): 8289~8296
- 24 Zhu Songjun, Zhang Bin, Yin Suqin *et al.*. Analysis of combining efficiency of spectral combining technique for fiber lasers[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(1): 11~15
- 祝颂军, 张彬, 阴素芹等. 光纤激光器谱合成系统合成效率的计算分析[J]. 光子学报, 2009, **38**(1): 11~15
- 25 Liu Guohua, Liu Deming. Theoretical study on spectral beam combining of fiber lasers [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(5): 723~727
- 刘国华, 刘德明. 光纤激光器频谱组束的理论研究[J]. 强激光与粒子束, 2007, **19**(5): 723~727
- 26 Chu Xingchun, Zhao Shanghong, Wu Zhuoliang *et al.*. Experimental research on spectral beam combination of $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ Co-doped double-clad fiber lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(4): 929~933
- 楚兴春, 赵尚弘, 吴卓亮等. $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺双包层光纤激光器谱组束实验研究[J]. 中国激光, 2010, **37**(4): 929~933