

❖ 特约专栏 ❖

外腔振荡式光纤激光光谱合成系统

张璟璞^{1,2}, 杨依枫¹, 赵翔^{1,2}, 柏刚^{1,2}, 何兵^{1,3}, 周军^{1,4}

- (1. 中国科学院上海光学精密机械研究所 上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800;
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 南京先进激光技术研究院, 江苏 南京 210038;
4. 南京中科神光科技有限公司, 江苏 南京 210038)

摘要: 光谱合成技术是一种有效的突破单根光纤激光器输出极限, 得到更高亮度的激光输出的方法。介绍了一种外腔振荡式单路光源的光纤激光光谱合成方案, 相比于现行的主振荡功率放大(Master Oscillator Power-Amplifier, MOPA)式单路光源的单光栅合成方案, 具有结构紧凑、阵列规模扩展能力强的优点。对该方案进行建模, 分析了合成系统中不同波长的单路激光光源的位置关系, 并对系统中的光纤排布、转换透镜像差等因素对合成效果的影响进行了仿真计算。搭建实验系统进行了初步的实验验证, 与理论结果能够吻合。对下一代光谱合成系统的构建以及光学元件的选择具有重要的指导意义。

关键词: 光谱合成; 光纤激光; 光纤振荡器; 衍射光栅

中图分类号: TN248.1 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201746.0103008

Spectral beam combining system of fiber laser by external-cavity fiber oscillator

Zhang Jingpu^{1,2}, Yang Yifeng¹, Zhao Xiang^{1,2}, Bai Gang^{1,2}, He Bing^{1,3}, Zhou Jun^{1,4}

- (1. Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Nanjing Institute of Advanced Laser Technology, Nanjing 210038, China;
4. Nanjing Zhongke Shengguang Technology Co. Ltd., Nanjing 210038, China)

Abstract: Spectral beam combining is an effective way to break through the power limitation of a monolithic fiber laser and achieve high brightness fiber laser output. A spectral beam combining scheme was presented that the single element was structured by external-cavity fiber oscillator. This scheme had more compact structure and was able to contain more elements, compared with the current MOPA structure element. A theoretical analysis was conducted about the relationship between the wavelength and position of each element, and a numerical simulation was carried out about the influence of aberrations in the transform lens on cavity loss and combining effects. An experimental system was built, and the experimental results agree well with the theoretical analysis. This work has important guiding significance for the building of next generation spectral beam combining system.

Key words: spectral beam combining; fiber laser; fiber oscillator; diffraction grating

收稿日期: 2017-06-10; 修订日期: 2017-08-20

基金项目: 国家自然科学基金(61405202, 61705243); 上海市自然科学基金(16ZR1440100, 16ZR1440200); 上海市优秀技术带头人计划(17XD1424800); 上海市青年科技英才扬帆计划(17YF1421200); 江苏省重点研发计划(BE2016005-4); 王宽诚教育基金

作者简介: 张璟璞(1994-), 男, 博士生, 主要从事光纤激光光谱合成方面的研究。Email: pujingzhang@163.com

导师简介: 何兵(1975-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事高功率光纤激光和光束合成方面的研究。

Email: bryanho@mail.siom.ac.cn

0 引言

随着光纤制作工艺与高亮度半导体激光泵浦源的发展,光纤激光输出功率迅速提升^[1-2]。然而,由于光纤的非线性效应、热致光损伤以及模式不稳定等因素的制约,单根光纤激光器的输出功率存在理论极限^[3-4]。光纤激光器的光束合成技术可以将多路激光束叠加,在提高输出功率的同时获得优良的光束质量,因此得到了广泛的关注和研究^[5-13]。光谱合成是一种利用色散元件将不同波长的子光束合成一束激光输出的合成方式,其结构无需复杂的相位控制机制,简单稳定,而且能够实现单一孔径输出,因此有着重要的研究价值^[10-13]。基于 MOPA 结构的光纤激光器能够实现窄线宽、高亮度的激光输出,是光谱合成系统的理想光源^[14-15]。国内外多家研究机构利用 MOPA 结构光纤激光器实现了数千瓦量级的光谱合成系统^[16-17]。但是这种结构的合成系统结构不够紧凑,在阵列扩展能力方面存在不足,因此合成系统进一步的输出亮度提升遇到了困难。外腔结构的振荡式单路光源光谱合成系统很好地克服了这些缺陷,但是又存在单路激光输出亮度不高的缺点^[6]。对外腔结构光谱合成系统的研究有助于综合两种结构的优点,设计出一种新型的光谱合成系统,达到更高功率量级的输出。

文中介绍了一种振荡式单路光源的线型腔光谱合成方案。对该方案中激光器的波长选择与位置排布的关系进行分析,并对系统中的光纤排布、转换透镜相差等因素对合成效果的影响进行了仿真计算。得出振荡器波长与光纤输出位置成线性相关关系;比较了球面镜与非球面镜在系统中的性能差异。根据实验室现有条件,搭建实验系统进行了初步的实验验证,能够与理论分析吻合。并根据理论和实验结果对新型光谱合成系统的设计提出了建议与展望。

1 理论模型与仿真分析

文中介绍的振荡式光谱合成系统的原理示意图如图 1 所示。入射激光阵列在转换透镜的焦平面上紧密排布,转换透镜将光纤出射的发散光束准直,并

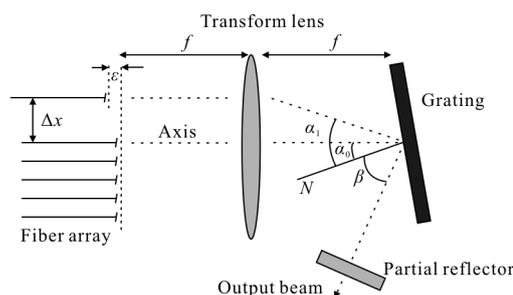


图 1 振荡式光谱合成系统原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of spectrum beam combining system by oscillator

以特定角度入射到位于共轭焦平面的衍射光栅面。部分输出镜与入射激光阵列一端的全反镜构成谐振腔。在这个系统中,衍射光栅既是腔内选模元件,又是合成元件。当有泵浦注入时,增益光纤中会产生增益带宽内的多波长的自发辐射,阵列上确定位置的光纤输出光经过透镜折射后,其在光栅面的入射角固定,不同波长的光衍射角不同,而只有衍射光方向垂直于输出镜片的光才能被反射回来,并重新耦合进入光纤中进行振荡,这样就达到了选模的效果。而阵列不同位置的光纤出射光经过透镜折射后,在光栅面的入射角不同,因此能够起振的波长也不同,这样就实现了光栅上每束光的波长和阵列的不同位置一一对应。从光栅方程上解释, $d(\sin\alpha+\sin\beta)=\lambda$, d 代表光栅的周期,当衍射角 β 固定,则波长随入射角变化。不同位置光纤激发的不同波长的激光,经过光栅衍射后的传播方向均与部分反射镜法线方向平行,输出光束实现了共孔径合成输出,输出光强相当于每路光纤输出光强的叠加。

在傍轴近似条件下,可以得出各路人射激光的波长与各自位置成线性关系,其波长间隔由光纤输出尾端的间距决定:

$$\Delta\lambda = \frac{(\Delta x)d\cos\theta_g}{f} \quad (1)$$

式中: Δx 为入射激光阵列中两激光束的间距; d 为光栅常数; θ_g 为衍射角; f 为透镜焦距。通过发射器密集排列在 V 型槽上的设计, Δx 可以很小,其极限数值由光纤直径决定^[6],这样相邻激光束的波长间隔就会很小,在一定的带宽内就能添加更多发射器,从而有效地增加了阵列扩展性能。

假定光纤平行于透镜光轴,则经过光栅和平面镜反射后重新耦合进入光纤的耦合效率用 $K(\lambda)$ 表示^[10]:

$$K(\lambda) = \frac{1}{\sqrt{(1+\omega_x^2)} \sqrt{(1+\omega_y^2)}} \quad (2)$$

式中： ω_x, ω_y 是与转换透镜焦距、像差以及光纤位置有关的量。为了简便计算，对其在光纤位置 (X, Y) 处进行二阶泰勒展开：

$$\omega_x = \frac{\varepsilon}{Z_r} + \frac{\alpha(\varepsilon, \delta)X^2 + \beta(\varepsilon, \delta)Y^2}{fZ_r} \quad (3)$$

$$\omega_y = \frac{\varepsilon}{Z_r} + \frac{\beta(\varepsilon, \delta)X^2 + \alpha(\varepsilon, \delta)Y^2}{fZ_r} \quad (4)$$

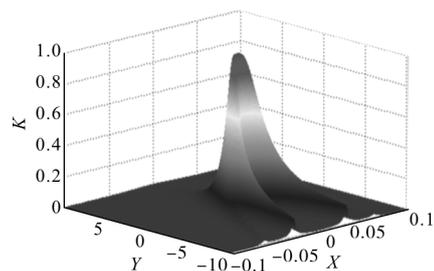
式中： $\alpha(\varepsilon, \delta), \beta(\varepsilon, \delta)$ 为透镜离焦参数的函数，可用线性函数近似， $\alpha(\varepsilon, \delta) = \alpha_0 + \alpha_1 \varepsilon / f, \beta(\varepsilon, \delta) = \beta_0 + \beta_1 \varepsilon / f$ ； ε 为光纤输出尾端与转换透镜焦平面的距离（如图 1 中所示）； f 为转换透镜的焦距。 $\alpha_0, \alpha_1, \beta_0, \beta_1$ 可根据透镜的形状和折射率由光线追迹法算出^[10]。 $Z_r = \pi w_0^2 / \lambda$ 是高斯光束的瑞利距离， w_0 是光纤中激光的模场半径， λ 是对应位置光纤的输出激光波长。

根据实验室现有条件，选择两组不同的透镜参数进行仿真，计算输出光纤在不同位置的空间光路耦合效率的变化情况。透镜 1 为双凸球面透镜，焦距为 200 mm；透镜 2 为特殊设计的平凸的非球面镜，焦距为 140 mm。

为了将不同透镜的仿真结果进行直观对比，图 2 中的位置坐标均进行了归一化处理：横坐标 $X = x/f$ 代表横向位置变化与透镜焦距的比值，通常认为该数值小于 0.1 时满足傍轴近似，纵坐标 $Y = \varepsilon / Z_r$ 代表纵向位置变化与高斯光束瑞利距离的比值。图 2(a) 中双凸球面镜系统的最大耦合效率的位置成二次曲线排布，表明能获得最大耦合效率的位置并不总处于焦平面；且 $K > 0.9$ （即耦合效率大于 90%）在横坐标上的范围 ΔX 处在 ± 0.01 之间；图 2(b) 中平凸非球面镜系统的最大耦合效率的位置成直线排布（转换透镜的平面朝向光纤阵列），满足条件的 ΔX 的范围为 ± 0.03 。根据之前的分析， X 方向的位置与波长成线性关系，因此满足耦合效率 $K > 0.9$ 的横坐标 ΔX 的范围决定了能够有效进行光谱合成 $\Delta \lambda_{gr}$ 的范围。由光栅方程可以推导得出公式(4)：

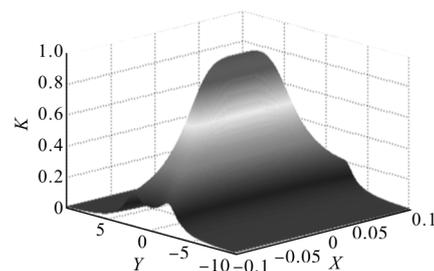
$$\Delta \lambda_{gr} = \Delta X d \cos \theta \quad (4)$$

式中： d 表示光栅周期。



(a) 双凸球面镜

(a) Simple spherical transform lens



(b) 特殊设计的平凸非球面镜

(b) A special designed plane-aspheric transform lens

图 2 光纤-腔的耦合效率与光纤尾端的位置关系

Fig.2 Fiber-cavity coupling efficiency versus fiber end position

纵坐标方向 $K > 0.9$ 的范围 ΔY 处在 ± 0.35 之间，通过对不同光纤中高斯光束瑞利距离的估算，不同输出光纤尾端与透镜焦平面的纵坐标的误差需要控制在 0.1 mm 量级，才能保证合成系统高效地工作。

2 实验装置

为了验证理论分析结果，如图 3 所示，实验搭建了两路外腔振荡式光纤激光光谱合成系统。两路光纤链路采用相同结构：将 50:50 的耦合器的一侧的两个端口熔接在一起，形成光纤环形反射器，作为激光器谐振腔的高反镜，耦合器的另外一个端口

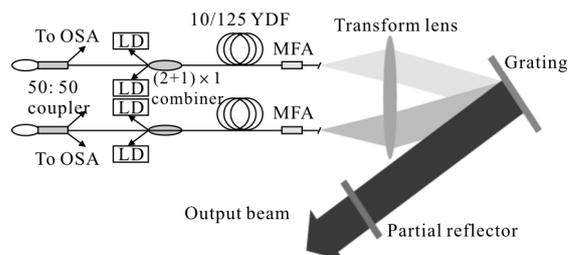


图 3 外腔振荡式光谱合成系统实验结构示意图

Fig.3 Experimental setup schematic diagram of spectrum

beam combining system by external-cavity oscillator

与(2+1)×1 合束器的信号光纤熔接,合束器的输出端口与 3.5 m 长的增益光纤熔接,增益光纤选用纤芯/内包层直径为 10/125 μm 的掺镱光纤。50:50 耦合器的另外一个端口作为后向输出光谱的监测端,10/125 增益光纤输出端与 10/125~20/400 的模场适配器连接,使得最终的光束得以从纤芯的数值孔径为 0.065 的 200/400 光纤输出,模场适配器的损耗为 0.7 dB。光纤平行于系统中心轴线放置,光纤尾端位于透镜焦平面附近;部分反射镜反射效率在 1 064±25 nm 为 20%。实验选择 200/400 光纤而不是直接用 10/125 光纤输出是因为前者的数值孔径 (Numerical Aperture, NA) 更低,传播至透镜上的光斑更小,所以经过后续元件反射、衍射后耦合回到光纤的效率更高,减小了腔损。

3 实验结果

实验中用单路光纤振荡器在横向的调谐来对多路不同位置的光纤输出进行模拟。

首先选择普通的双凸球面镜作为系统内的转换透镜,调整好光路后,将光纤输出头置于初始位置,此时输出激光中心波长为 1 069.7 nm,通过旋转三维调整架改变光纤位置,横向每改变 0.5 mm,记录一组光谱,一直到不再出现激光振荡为止,记录此时输出激光的中心波长为 1 083.6 nm。调谐的过程中一直有对应波长的激光输出,光谱的调谐范围为 13.9 nm。说明该系统可用于的光谱合成的光谱范围为 13.9 nm。实验中的光谱变化如图 4 所示。

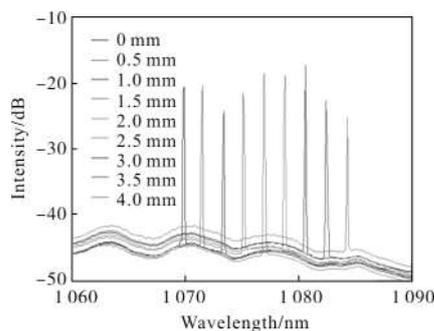


图 4 简单球面透镜系统调谐光谱

Fig.4 Tuned spectrum of simple spherical transform lens system

由前文理论仿真部分可知,对于双凸球面镜系统, $\Delta X \approx 0.02$, 实验中所用光栅的线密度是 960 lines/mm, 所以 $d=1\ 042\ \text{nm}$, 衍射角 $\theta \approx 48^\circ$, 代入公式(4)计算得出 $\Delta \lambda_{\text{gr}} \approx 14\ \text{nm}$ 。与实验数据 13.9 nm

基本一致。理论仿真在对输出激光中心波长和位置的关系的预测上也得到了实验验证:中心波长与位置的关系如图 5 所示,经过拟合,可以得到两者呈线性关系,斜率 3.62 nm/mm,约等于公式(1)计算得出的理论值 3.48 nm/mm。

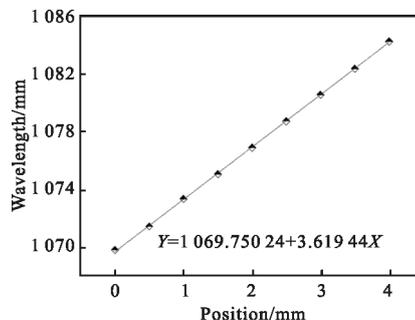


图 5 简单球面透镜系统输出波长随光纤位置变化的关系

Fig.5 Output wavelength versus fiber X-axis position of simple spherical transform lens system

对于特殊设计过的平凸的非球面镜作为转换透镜的系统,实验结果同样与仿真结果拟合的很好:实验中的光谱变化如图 6 所示,中心波长与位置的关系如图 7 所示。

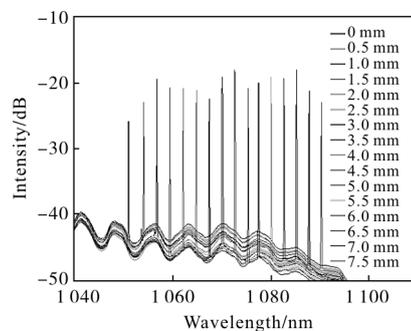


图 6 平凸透镜系统调谐光谱

Fig6 Tuned spectrum of plane-aspheric transform lens system

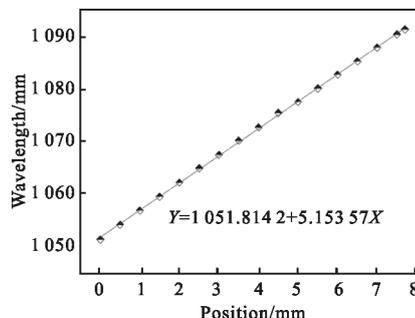


图 7 平凸透镜系统输出波长随光纤位置变化的关系

Fig.7 Output wavelength versus fiber X-axis position of plane-aspheric transform lens system

实验中得到有效输出的光谱范围 39.7 nm, 输出激光中心波长随光纤位置变化的斜率为 5.15 nm/mm。理论上 $\Delta X \approx 0.06$, 计算出的有效的合成光谱的范围 $\Delta \lambda_{\text{eff}} \approx 42$ nm, 斜率的理论数值为 4.98 nm/mm, 能够与实验结果印证。

当两路光纤链路同时工作时, 测量输出激光的光谱如图 8 所示。光谱可以明确观察到两个峰值, 分别对应两路光纤链路的输出波长, 且输出功率为两路单独工作时输出功率之和。

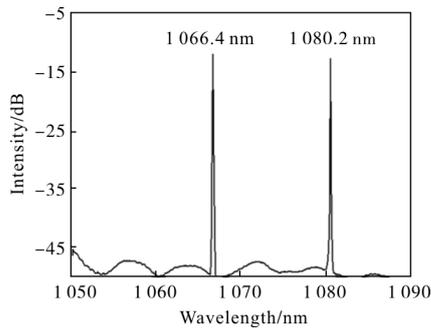


图 8 两路激光器的合成输出光谱

Fig.8 Output spectrum of two-element spectral beam combining

4 结 论

文中介绍了一种外腔振荡式光纤激光光谱合成方案。通过建模和仿真, 得出该方案中激光器的波长与其在合成系统中所处的横向 (垂直衍射光栅刻线的方向) 位置呈线性关系, 斜率由光栅常数和透镜焦距共同决定。转换透镜的焦距越长, 合成系统能容纳的光谱密度越高; 另一方面, 系统中转换透镜的面型也影响着合成系统的阵列扩展能力, 平凸非球面镜要优于双凸球面镜, 而且平凸透镜系统的光纤阵列尾端直线排列时具有最大合成效率, 便于实际操作。实验中对波长和激光器位置的关系以及不同透镜系统的有效合成光谱范围进行了实验验证, 与理论能够吻合。基于这种外腔式的光谱合成系统, 将振荡式单路光源替换成 MOPA 结构的高功率光纤激光器, 有望实现单路激光功率高、阵列扩展能力强的新型光纤激光光谱合成系统。

参考文献:

[1] Richardson D J, Nilsson J, Clarkson W A. High power fiber lasers: current status and future perspectives [J]. *JOSA B*,

2010, 27(11): B63-B92.
 [2] Zervas M N, Codemard C A. High power fiber lasers: A review [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20(5): 219-241.
 [3] 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.
 [4] Smith A V, Smith J J. Mode instability in high power fiber amplifiers [J]. *Optics Express*, 2011, 19(11): 10180-10192.
 [5] Sprangle P, Ting A, Penano J, et al. Incoherent combining and atmospheric propagation of high-power fiber lasers for directed-energy applications [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2007, 45(2): 138-148.
 [6] Augst S J, Ranka J K, Fan T Y, et al. Beam combining of ytterbium fiber amplifiers (Invited) [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2007, 24(8): 1707-1715.
 [7] He B, Lou Q, Zhou J, et al. High power coherent beam combination from two fiber lasers [J]. *Optics Express*, 2006, 14(7): 2721-2726.
 [8] Goodno G D, McNaught S J, Rothenberg J E, et al. Active phase and polarization locking of a 1.4 kW fiber amplifier [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(10): 1542-1544.
 [9] Zhou P, Ma Y, Wang X, et al. Coherent beam combination of three two-tone fiber amplifiers using stochastic parallel gradient descent algorithm [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(19): 2939-2941.
 [10] Bochove E. Theory of spectral beam combining of fiber lasers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2002, 38(5): 432-445.
 [11] Fan T Y. Laser beam combining for high-power, high-radiance sources [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2005, 11(3): 567-577.
 [12] Loftus T H, Thomas A M, Hoffman P R, et al. Spectrally beam-combined fiber lasers for high-average-power applications [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2007, 13(3): 487-497.
 [13] Schreiber T, Wirth C, Schmidt O, et al. Incoherent beam combining of continuous-wave and pulsed Yb-doped fiber amplifiers [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, 15(2): 354-360.
 [14] Ma Pengfei, Tao Rumao, Su Rongtao, et al. 1.89 kW all-

- fiberized and polarization -maintained amplifiers with narrow linewidth and near -diffraction -limited beam quality [J]. *Optics Express*, 2016, 24(4): 4187-4195.
- [15] Liu Guangbo, Yang Yifeng, Wang Jianhua, et al. SBS enhancement factor improvement in 11.6 GHz linewidth, 1.5 kW Yb-doped fiber amplifier [J]. *Chinese Physics Letters*, 2016, 33(7): 074207.
- [16] Zheng Ye, Yang Yifeng, Wang Jianhua, et al. 10.8 kW spectral beam combination of eight all -fiber superfluorescent sources and their dispersion compensation [J]. *Optics Express*, 2016, 24(11): 12063-12071.
- [17] Wirth C, Schmidt O, Tsybin I, et al. High average power spectral beam combining of four fiber amplifiers to 8.2 kW [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(16): 3118-3120.