

·测试、试验与仿真·

3×1 宽谱功率合束器数值仿真分析

赵成海¹, 罗建花^{1,2}, 吴武明², 李 盾², 陈胜平²

(1. 中南林业科技大学 理学院, 长沙 410004; 2. 国防科技大学 前沿交叉学科学院, 长沙 410073)

摘要:功率合束器能获得高功率的激光输出, 而选择超连续谱激光作为输入光源能获得宽光谱, 两者结合的宽谱功率合束器是目前的一个研究热点。文中数值模拟分析了基于超连续谱光源非相干功率合束的3×1宽谱功率合束器。对比分析不同波长合束后传输效率、光束质量的变化。通过对比分析不同波长的仿真结果, 评价该种结构的3×1宽谱功率合束器对宽谱光源的合束效果, 以期对光纤宽谱功率合束器的制作和使用提供参考。

关键词:功率合束器; 超连续谱光源; 数值仿真; 光束质量

中图分类号: O439

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2018)-01-0054-06

Numerical Simulation Analysis of 3×1 Broadband Fiber Power Beam Combiner

ZHAO Cheng-hai¹, LUO Jian-hua^{1,2}, WU Wu-ming², LI Dun², CHEN Sheng-ping²

(1. College of Science, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China;

2. College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: High power laser output can be obtained by a power beam combiner. The supercontinuum laser is chosen as the input light source to obtain a broadband. So the broadband power combiner with the combination of the both is a hotspot. The 3×1 broadband power beam combiner based on the incoherent power combination of supercontinuum sources is simulated and analyzed. The various of the transmission efficiency and the beam quality of different combined wavelengths are compared and analyzed. By comparing and analyzing the simulation results of different wavelengths, the combined effect of the 3×1 broadband power combiner on the broadband light source is evaluated. And it can provide references for fabrication and use of the broadband power combiner.

Key words: power combiner; supercontinuum source; numerical simulation; beam quality

随着光纤的制造工艺和泵浦技术的不断进步, 光纤激光器的输出功率和光束质量不断得到改善^[1-2]。然而受热损伤、非线性效应等因素的影响, 单根光纤输出的功率是有限的^[3]。为了获得更高功率的光纤激光输出, 对多路的激光进行非相干合束是一个很好的解决方法。将多路低功率的激光合束到一根较粗的输出光纤中, 既可以降低光纤的热损耗, 又可以提高激光的输出功率, 因此可以打破单根光纤低输出功率的瓶颈。其中光纤功率合束器是这

一技术的核心器件^[4]。

目前光纤功率合束器大多使用的是传统激光来进行合束, 而普通激光光源的光谱都很窄, 无法满足对不同波长成分的合束要求。超连续谱光源是一种拥有宽光谱的激光光源, 近年来在光通信、光谱学、生物医学成像等领域有着广泛的应用^[5-7]。通过对超连续谱光源进行非相干功率合束, 不仅能实现高功率的激光输出, 且能拥有很宽的光谱, 可以满足不同波长光的需求。

收稿日期: 2018-01-08

基金项目: 国家自然科学基金(11504434 31500476 1140441011504424); 湖南省自然科学基金(2015JJ3174)资助

作者简介: 赵成海(1992-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤生物传感; 导师(通讯作者): 罗建花(1980-), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为光纤生物传感。

评价功率合束器性能有两个重要的指标,分别是输出功率和光束质量。对于宽谱功率合束器,要求其输出光谱应和输入光谱保持一致,同时在保持大功率输出的基础上保持好的光束质量,这些都是需要重点关注并加以解决的关键问题。

在超连续谱光源的基础上,对其进行非相干合束,设计一种3×1宽谱功率合束器并对其进行了数值仿真分析。通过对比不同波长的光合束后输出功率和光束质量的变化,评价该种结构的3×1宽谱功率合束器对宽谱光源的合束效果,以期对光纤宽谱功率合束器的制作和应用提供参考。

1 功率合束器的理论分析

光纤功率合束器制作中最重要的步骤是熔融拉锥光纤束。在拉锥时需要遵循两个基本原则:绝热拉锥与亮度守恒^[8-10],用绝热拉锥原则确定拉锥区所需的最短长度,用亮度守恒原则决定拉锥前后光纤直径的减小比例。

图1为单根拉锥光纤示意图。

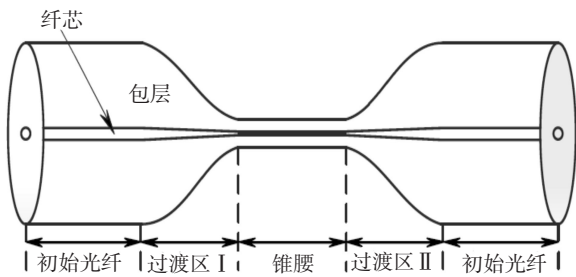


图1 单根拉锥光纤示意图

拉锥后的光纤主要分为初始光纤、拉锥过渡区和锥腰部分。在拉锥过程中包层和纤芯直径保持同比例的减小,光在其中的传播模式也在相应的变化。若拉锥过快使得过渡区的倾斜角过大,则会使纤芯中的光泄露到包层中,增加合束损耗。因此为了实现低损耗拉锥,过渡区倾斜角的变化要足够缓慢,过渡区的长度要足够长,即满足绝热拉锥条件。

第二个需要遵循的拉锥原则是亮度守恒原则。假设入射光场均匀入射,则集成亮度(integrated brightness, IB)可以用积分的形式表示为

$$IB = AR \int_0^{\Omega_c} d\Omega \propto A \int_0^{\varphi} \sin \phi d\phi = A[1 - \cos \varphi] \quad (1)$$

在设计合束器制作参数时,为了降低合束器的损耗,要求输出光纤的集成亮度大于或等于输入光

纤的总集成亮度,即

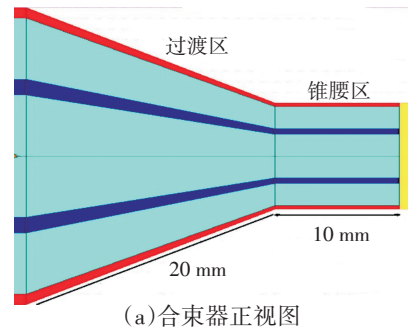
$$BR = \frac{IB_{out}}{IB_{in}} \approx \frac{A_{out} NA_{out}^2}{N(A_{in} NA_{in}^2)} = \frac{D_{out}^2 NA_{out}^2}{N(D_{in}^2 NA_{in}^2)} \geq 1 \quad (2)$$

在上式中,BR表示输出与输入集成亮度之比;N表示输入光纤的数量;D_{out}和D_{in}分别表示输出、输入光纤的纤芯直径,该式也就是亮度守恒公式。

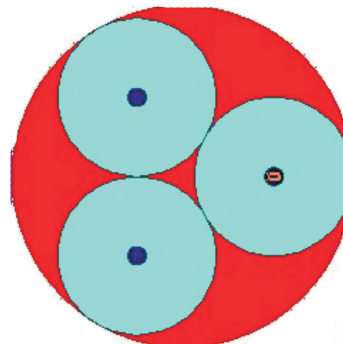
在以上两个基本原则的基础上,模拟仿真设计基于超连续谱光源非相干功率合束的3×1宽谱功率合束器,分析和计算了不同波长、不同参数的输出光纤情况下合束器的传输效率和光束质量与波长的关系。

2 仿真分析

首先对合束器建模。文中设置两种不同的合束器,两种合束器的输入光纤为同一型号,输出光纤为不同的型号。定义输入光纤为纤芯/包层直径15/130 μm的无源光纤,NA为0.08和0.46,光纤束所在硅玻璃管折射率设置为1.43,输出光纤纤芯/包层直径分别为50/125 μm和100/125 μm,纤芯NA分别为0.22和0.15,他们的拉锥比例分别是5.6和2.8。定义输出光纤为50/125 μm的为合束器1,输出光纤为100/125 μm的为合束器2,对比数值仿真分析两种合束器的合束效果。图2为合束器结构示意图。



(a)合束器正视图



(b)合束器左侧输入端视图

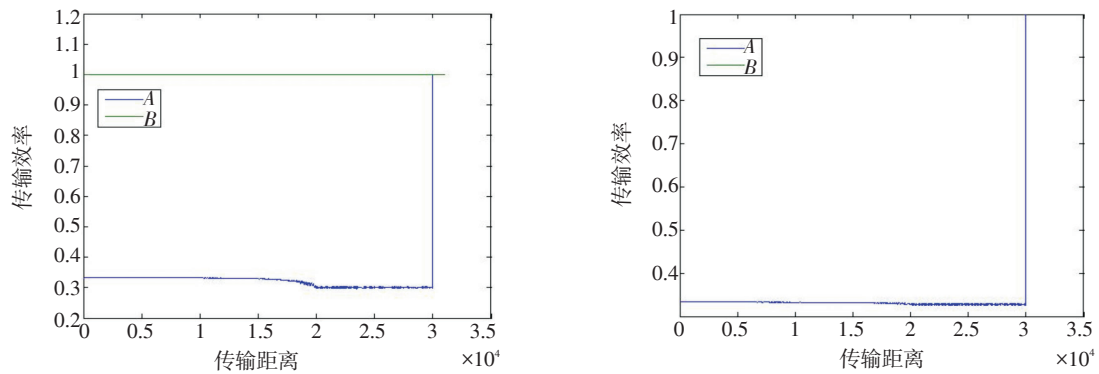
图2 合束器结构示意图

图2a为3×1合束器模型的正视图,图2b为模型的左侧输入端视图,右端为输出端。输出端部分是将3根光纤的包层全部拉锥至输出光纤的纤芯范围内,以便将输入端的光全部耦合进输出光纤纤芯内。仿真中各部分长度分别设置为:输入光纤长1 mm,拉锥过渡区长20 mm,锥腰长10 mm,输出光纤长1 mm。

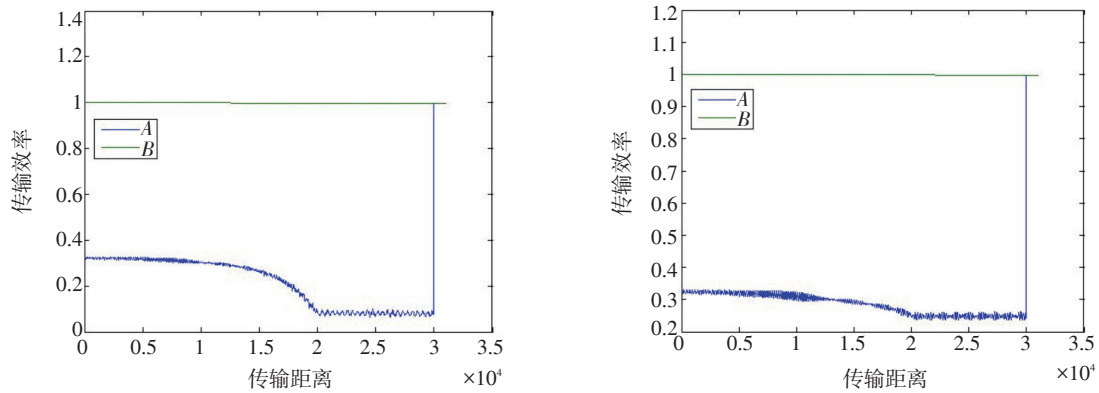
为了实现对超连续谱光源的数值仿真,选取不同波长的光进行分析,分别为500 nm、1 064 nm、1 550 nm、2 000 nm和2 500 nm。在仿真中,不同波

长的光均以基模耦合进输入光纤中,经过计算得到合束器的功率传输效率。功率传输效率指的是合束器输出功率与输入总功率的比值。

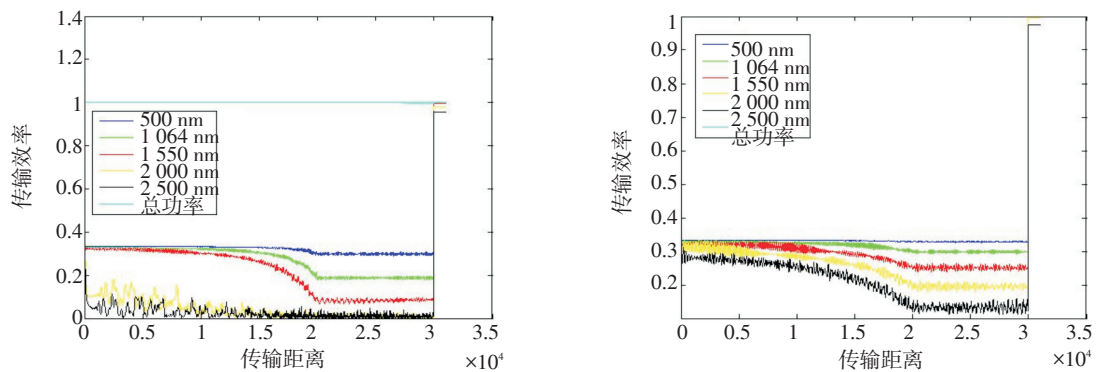
首先分析合束器的传输效率,高的传输效率意味着高的输出功率。因为合束器是3路对称结构,因此分析其中一路即可。设进入输入光纤的总能量为1,则单路光纤的总能量约为1/3。如图3所示为单路光纤纤芯中能量随传输距离的变化情况,左侧为合束器1,右侧为合束器2。



(a)500 nm时不同合束器中光功率的变化



(b)1 550 nm时不同合束器中光功率的变化



(c)不同合束器中各波长光功率变化

图3 光在合束器中沿轴向的功率变化

其中A表示的是传输路径为输入光纤拉锥过渡区纤芯-拉锥锥腰区纤芯-输出光纤纤芯内能量随传输距离的变化,B表示的是合束器总功率随传输距离的变化。在过渡区可以看到,光纤纤芯内的光能量逐渐降低扩散进包层中,所以它的曲线在不断降低;至锥腰区,纤芯内的能量部分扩散进包层,如图可以看出波长越大,扩散进包层的能量越多;在输出端,无论是纤芯内的能量还是包层中的能量最终都耦合进输出光纤中,最终传输效率达到99%左

右。再对比两种合束器,发现当相同波长时,拉锥比例更大的合束器中,光场能量扩散进包层的越多;当波长增大时,两种合束器都表现出光场能量更多的扩散进包层的趋势,如图3c所示。

再对合束器的光束质量进行分析。如图4和图5所示为波长为1 064 nm和1 550 nm时入射光分别从3路入射后进入合束器1和合束器2时在合束器的输出端的光场分布。

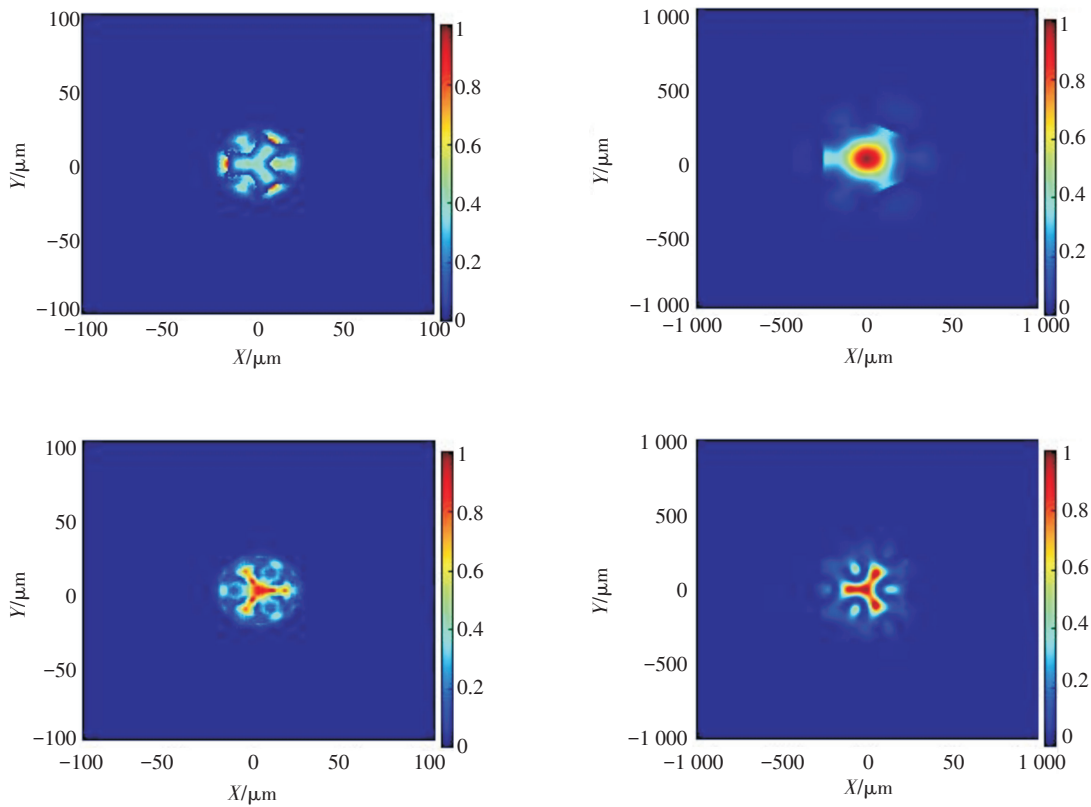
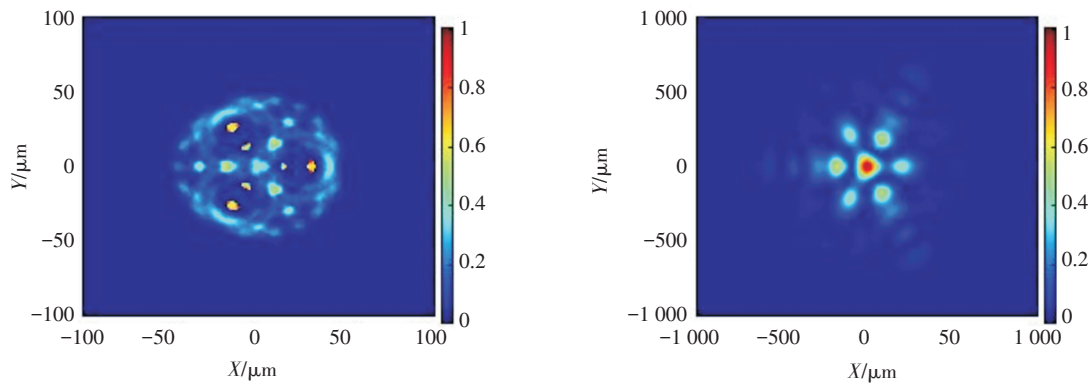


图4 合束器1中不同波长的输入光场和输出光场



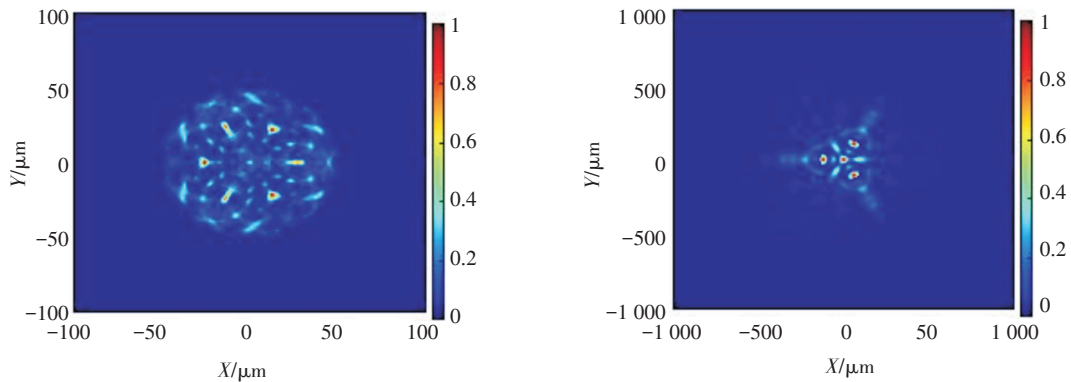


图5 合束器2中不同波长的输入光场和输出光场

计算了不同输出光纤不同波长的光束质量如表1和表2。

表1 合束器1中不同波长入射光的输出光束质量

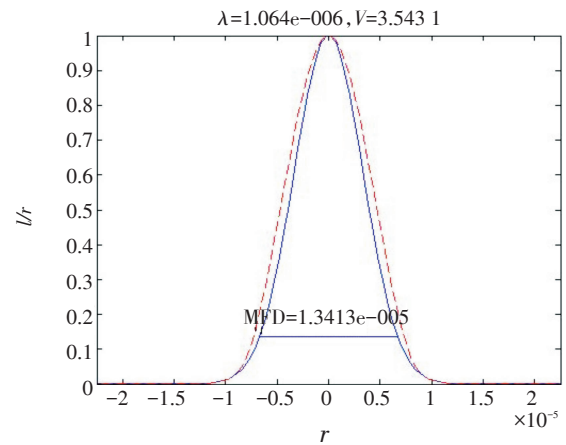
波长 /nm	500	1 064	1 550	2 000	2 500
M_x^2	13.07	3.58	3.49	5.88	7.99
M_y^2	12.86	3.51	3.47	6.2	7.96

表2 合束器2中不同波长入射光的输出光束质量

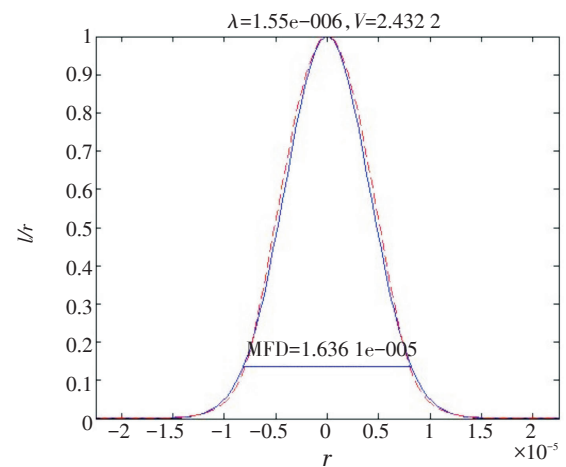
波长 /nm	500	1 064	1 550	2 000	2 500
M_x^2	20.01	6.94	5.03	6.82	9.63
M_y^2	19.72	6.93	5.24	6.76	10.7

在 500 nm 时,两种合束器的输出光束质量都非常差,这是由于短波长的光在较粗的输出光纤中带有多种模式造成的。随着波长的增加,一直到 1 550 nm, M^2 随波长而变小。但当波长超过 1 550 nm, M^2 随着波长增大反而减小。这是由于纤芯对长波长的光束束缚能力变差,在锥腰区,光纤被拉锥的很细,3根光纤相接触的位置部分融合在一起,纤芯与纤芯之间相隔很近,纤芯中的光向彼此泄露,反应到输出端就是有更多的光在输出光纤的纤芯中心位置输出,因此光束质量随波长增大而变好。而随着波长继续增大,有更多的光泄露到了包层中,因此在输出端,反而光束质量会变差,而且长波长更容易引发各种非线性效应,对输出光的光束质量产生影响。

因此,以 1 064 nm 和 1 550 nm 两个波长为例计算了光纤的模场直径,如图6所示。



(a) 波长为 1 064 nm 时,光纤的模场直径



(b) 波长为 1 550 nm 时,光纤的模场直径

图6 不同波长时,光纤的模场直径

由图可见,波长越大光纤的模场直径越大,因此可以解释当波长越大更多的光泄露到包层中,影

响了输出光的光束质量。

3 结 论

模拟仿真设计基于超连续谱光源非相干功率合束的3×1宽谱功率合束器,分析和计算了不同波长、不同参数的输出光纤情况下合束器的传输效率和光束质量与波长的关系。发现拉锥比例越大的光纤对光的束缚能力越弱,且在锥腰区,波长越大的光更容易泄露到包层中,最终合束器中的光几乎都耦合进输出光纤,平均合束效率达到99%以上,皆满足超连续谱的合束。同时,相对同一波长而言拉锥比例更大的合束器输出光束质量更好,而对于同一合束器而言波长增大时 M^2 先是不不断减小而后不断增大。

参考文献

- [1] 刘颂豪. 光纤激光器的新进展[J]. 光电子技术与信息, 2003, 16(1): 1-7.
- [2] 楼祺洪, 周军, 朱健强, 等. 高功率光纤激光器研究进展[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(2): 135-138.
- [3] Galvanauskas A. High power fiber lasers[J]. Optics and Photonics News, 2004, 15(7): 42-47.
- [4] 陈子伦, 周旋风, 王泽锋, 等. 基于7×1光纤功率合束器

的大于6 kW的光纤激光合成[J]. 中国激光, 2015(12): 307-308.

- [5] Yao J, Zhang B, Yin K, et al. High-mode mid-infrared supercontinuum source based on low-loss fusion spliced silica and chalcogenide fiber[C]//International Conference on Optical Communications and Networks IEEE, 2017: 946.
- [6] Yin K, Zhang B, Yao J, et al. Highly stable, monolithic, single-mode mid-infrared super continuum source based on low-loss fusion spliced silica and fluoride fibers[J]. Optics Letters, 2016, 41(5): 946.
- [7] Zhao Z, Wang X, Dai S, et al. 1.5-14 μm midinfrared supercontinuum generation in a low-loss Te-based chalcogenide step-index fiber[J]. Optics Letters, 2016, 41(22): 5222.
- [8] Jonathan M Ward, Danny G O'Shea, Brian J Shortt, et al. Heat-and-pull rig for fiber taper fabrication[J]. Review of Scientific Instruments, 2006, 77(8): 825-1.
- [9] Wang Y, Li J, Zhai B, et al. Tunable and switchable dual-wavelength mode-locked Tm³⁺-doped fiber laser based on a fiber taper[J]. Optics Express, 2016, 24(14): 15299.
- [10] Tian Y, Zhao J Q, Gao W, et al. Narrow line-width Tm³⁺-doped double-clad silica fiber laser based on in-line cascade biconical tapers filter[J]. Laser Physics Letters, 2010, 7(4): 298-302.

(上接第19页)

- 及其在飞行器和军事伪装中的应用[J]. 宇航材料工艺, 2004, 2: 21-25.
- [2] 白天, 王秀兰. 隐身材料的现状及发展趋势[J]. 宇航材料工艺, 2015, 6: 8-10.
- [3] 张莉莉, 杨娟, 李丹, 等. 纳米金属Pt催化苯胺无电聚合[J]. 南京理工大学学报, 2004, 28(4): 432-435.
- [4] A J Heeger. 半导体性与金属性聚合物[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [5] 王宪栋, 赵尔波. 导电高分子材料在隐身技术中的应用[J]. 红外, 2011, 32(11): 39-43.
- [6] 陈丽娟, 翁少煌, 周剑章, 等. 固态导电聚合物多色电致变色器件的制备[J]. 高等学校化学学报, 2010, 31(4):

790-795.

- [7] 范建熙, 马一平. 温致透光率变化智能遮阳材料的研究进展[J]. 材料导报A, 2013, 27(12): 131-134.
- [8] 周集体, 吴丽丽, 张爱丽, 等. 膜萃取处理高浓度苯胺废水膜传质动力学[J]. 大连理工大学学报, 2010, 50(1): 20-25.
- [9] 卢海, 张治安, 赖延清, 等. 超级电容器用导电聚苯胺电极材料的研究进展[J]. 电池, 2007, 37(4): 309-311.
- [10] 纪禹行, 秦川丽, 郑冰, 等. 玻璃基底/Ag纳米薄膜/聚苯胺电致变色薄膜的制备[J]. 光电子·激光, 2013, 24(12): 2344-2348.