

# 基于掺铒光子晶体光纤超荧光光源的实验研究

吴 旭<sup>1</sup> 阮双琛<sup>1</sup> 刘承香<sup>1\*</sup> 张 力<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 深圳大学电子科学与技术学院深圳市激光工程重点实验室, 广东 深圳 518060)  
(<sup>2</sup> 深圳大学信息工程学院深圳市激光工程重点实验室, 广东 深圳 518060)

**摘要** 为了改进传统掺铒光纤超荧光光源的输出稳定性, 提出基于掺铒光子晶体光纤的超荧光光源。构建了单程后向结构掺铒光子晶体光纤超荧光光源, 研究了这种新型光源的输出特性。分析了掺铒光子晶平均波长体光纤长度和抽运功率对光源输出功率、光谱谱宽和平均波长的影响。结果表明, 通过优化选取光纤长度 28 m 和抽运功率 220 mW, 获得了单程后向结构超荧光光源输出如下: 输出功率 45.74 mW、光-光转换效率 20.79 %、谱宽 31.5 nm 和平均波长 1548.003 nm。该实验结果为进一步研究掺铒光子晶体光纤超荧光光源在不同环境下的稳定性奠定了基础。

**关键词** 光学器件; 超荧光光纤光源; 掺铒光子晶体光纤; 光纤长度; 抽运功率; 输出特性

**中图分类号** U666.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0306005

## Experimental Investigation on Superfluorescent Sources Based on Erbium-Doped Photonic Crystal Fiber

Wu Xu<sup>1</sup> Ruan Shuangchen<sup>1</sup> Liu Chengxiang<sup>1\*</sup> Zhang Li<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Shenzhen Key Laboratory of Laser Engineering, College of Electronic Science and Technology, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China

<sup>2</sup> Shenzhen Key Laboratory of Laser Engineering, College of Information Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China

**Abstract** In order to improve the stability of conventional erbium-doped superfluorescent fiber source, a superfluorescent fiber source based on erbium-doped photonic crystal fiber was proposed. A superfluorescent fiber source with a single-pass backward configuration was constructed and the output properties of the new fiber source were researched. The influences of fiber length and pump power on output power, spectral width and mean wavelength of fiber source were analyzed. By choosing the optimized fiber length of 28 m and pump power of 220 mW, the superfluorescent fiber source had an output power of 45.74 mW, an optical-to-optical conversion efficiency of 20.79 %, a spectral width of 31.5 nm and a mean wavelength of 1548.003 nm. This result would set the foundation to further investigate the stability of erbium-doped photonic crystal fiber superfluorescent source in the different environment.

**Key words** optical devices; superfluorescent fiber source; erbium-doped photonic crystal fiber; fiber length; pump power; output properties

**OCIS codes** 060.2410; 060.5295; 140.6630; 230.2285

## 1 引 言

掺铒光纤超荧光光源是基于掺铒光纤放大自发

辐射的一种宽谱光源, 因其具有高平均波长稳定性、宽光谱和高输出功率等特性<sup>[1~3]</sup>, 已被广泛应用于

收稿日期: 2011-08-24; 收到修改稿日期: 2011-10-20

基金项目: 武器装备预研基金项目(9140A09010208QT5101)和深圳市科技研发项目(JG2010035, JG2010034)资助课题。

作者简介: 吴 旭(1983—), 男, 博士研究生, 主要从事掺铒光纤光源方面的研究。E-mail: wuxukai335@sohu.com

导师简介: 阮双琛(1963—), 男, 博士, 教授, 主要从事超快光学器件方面的研究。E-mail: scruan@szu.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: chxliu@szu.edu.cn

光纤陀螺、光纤传感器和低相干光学成像等领域<sup>[1~4]</sup>。特别是应用于光纤陀螺,光源的高输出功率可以提高陀螺系统的信噪比,宽光谱可以降低瑞利散射、偏振交叉耦合和克尔效应等引起的相干误差,高平均波长稳定性可以保证光纤陀螺标度因子的线性度和稳定性,使光纤陀螺的灵敏度及精度大大提高,因此掺铒光纤超荧光光源被认为是高精度光纤陀螺用光源的理想选择<sup>[2]</sup>。

目前,掺铒光纤超荧光光源的输出功率和光谱谱宽都达到了高精度光纤陀螺的要求,而最重要的光源输出指标——平均波长稳定性小于 $10^{-6}$ <sup>[2]</sup>,至今还未见文献报道,但是,许多学者一直在研究提高光源的平均波长稳定性的方法<sup>[5~8]</sup>。

在掺铒光纤光源中,掺铒光纤作为光源最为关键的增益媒介和传输部件<sup>[8,9]</sup>,其性能直接影响着光源的稳定性和输出特性,因此采用高性能掺铒光纤是提升光源性能的最佳途径之一。近些年出现的新型光纤——光子晶体光纤(PCF),相比于传统光纤,在温度特性<sup>[10]</sup>、弯曲特性<sup>[11]</sup>、传输特性<sup>[12]</sup>和色散特性<sup>[13,14]</sup>等方面具有明显优势。因此,基于掺铒光子晶体光纤(EDPCF)的超荧光光源为进一步提高光源性能提供一种新的解决途径。本文采用掺铒光子晶体光纤构建了单程后向结构超荧光光纤光源,研究分析了掺铒光子晶体光纤超荧光光源输出特性。

## 2 基于掺铒光子晶体光纤的超荧光光源

### 2.1 掺铒光子晶体光纤

实验中所使用的掺铒光子晶体光纤为武汉烽火藤仓有限公司研制,光纤截面的扫描电镜图如图1所示。光纤包层中含有7层空气孔,空气孔直径约

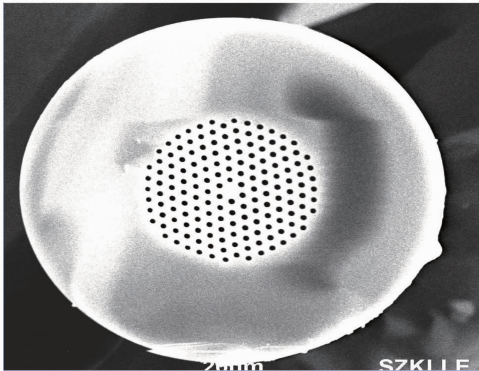


图1 掺铒光子晶体光纤截面扫描电镜图  
Fig. 1 Scanning electron microscopic image of the EDPCF

$2.0 \mu\text{m}$ ,孔间距约 $4.0 \mu\text{m}$ ,纤芯中掺铒区域直径约 $4.0 \mu\text{m}$ ,模场直径约 $4.34 \mu\text{m}$ ,吸收系数分别为 $5.5 \text{ dB/m}$ 在 $980 \text{ nm}$ 和 $12.2 \text{ dB/m}$ 在 $1550 \text{ nm}$ 。

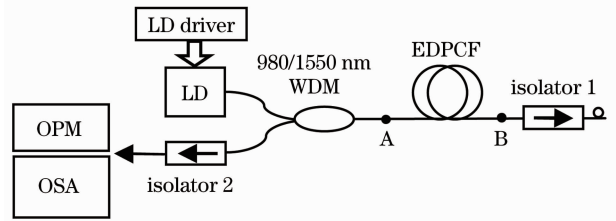


图2 单程后向超荧光光纤光源示意图

Fig. 2 Schematic diagram of single-pass backward superfluorescent fiber source

### 2.2 光源结构

单程后向结构掺铒光子晶体光纤超荧光光源实验装置如图2所示,采用LDC-3744B抽运驱动器(LD driver)驱动半导体激光二极管(LD)发出 $974.2 \text{ nm}$ 抽运光,通过 $980/1550 \text{ nm}$ 波分复用器(WDM)激发增益介质——掺铒光子晶体光纤,产生平均波长为 $1550 \text{ nm}$ 的超荧光,其中前向超荧光(与抽运光同向)通过隔离器1(Isolator 1)被隔离损耗,光源主要利用的是后向超荧光(与抽运光反向),通过隔离器2(Isolator 2)输出,最后利用光谱仪(OSA)和光功率计(OPM)分别测试光源的光谱信息和输出功率。

### 2.3 低损耗熔接

图2中点A表示EDPCF与WDM的单模尾纤(HI 980)的熔接点,点B表示EDPCF与隔离器的单模尾纤(SMF 28)的熔接点。由于光子晶体光纤包层中特殊的周期性多孔结构,导致其与普通单模光纤耦合比较困难<sup>[15]</sup>。为了构建实用化的掺铒光子晶体光纤超荧光光源,已开展了EDPCF与普通单模光纤的低损耗熔接实验研究<sup>[16]</sup>。

表1记录了EDPCF与单模光纤HI 980和SMF 28的熔接损耗,其熔接损耗均低于 $0.2 \text{ dB}$ ,其中EDPCF与SMF 28关于 $980 \text{ nm}$ 抽运光的熔接损耗没有列出,是由于它们之间的熔接损耗大小对光源没有影响。每个熔接点都经过标准拉力测试,满足掺铒光子晶体光纤超荧光光源的应用要求。

表1 掺铒光子晶体光纤与单模光纤的熔接损耗

Table 1 Splice losses between EDPCF and single-mode fibers

Wavelength /nm	980	1550
From HI 980 to EDPCF (A point) /dB	0.078	0.093
From EDPCF to SMF 28 (B point) /dB	—	0.12

### 3 光源的输出特性

#### 3.1 光纤长度对光源输出的影响

在实验中,采用了不同长度掺铒光子晶体光纤,如图2所示,构建了掺铒光子晶体光纤超荧光光源,分析了其对光源输出特征参数(输出功率,光谱谱宽和平均波长)的影响。图3和图4是掺铒光子晶体光纤长度对光源输出平均波长和光谱带宽的影响,在光纤长度为20~32 m的范围内,在3个抽运功率下的变化趋势一致。图3中,当光纤长度小于28 m时,平均波长随光纤的延长而向长波长方向漂移,这主要是由于信号光的二次吸收所致,当光纤长度大于28 m时,平均波长随光纤长度的变化明显减小,这是由于光纤中增益和吸收趋于平衡。图4中光源光谱带宽在光纤长度为28 m时达到最大,并且在其它长度下光源谱宽均大于27.8 nm。表2为输出功率随光纤长度的变化,光纤长度在20~32 m之间变化时,对应每个抽运功率下的光源输出功率变化小于0.9 mW,光-光转化效率都大于20%,并且光纤长度在28 m时,光源输出功率最大。因此,通过对比分析光纤长度对光源输出特性的影响,选定用于超荧光光源的掺铒光子晶体光纤长度为28 m。

表2 输出功率随光纤长度的变化

Table 2 Output power versus fiber length

Pump power /mW	180	220	260
Fiber length /m	Output power /mW		
32	36.998	45.336	53.613
28	37.159	45.74	53.991
26	36.855	45.015	53.321
24	36.628	45.426	53.823
20	36.331	45.265	53.101

#### 3.2 抽运功率对光源输出的影响

在所确定的28 m掺铒光子晶体光纤下,分析了抽运功率对光源输出特征参数的影响。图5是掺铒光子晶体光纤超荧光光源输出功率和光-光转换效率与抽运功率的变化关系。可以看出,随着抽运功率的增加,光源的输出功率近似线性增大。当抽运功率在0~120 mW时,光-光转换效率随抽运功率的增加而增大,当抽运功率大于120 mW,图中显见,光-光转换效率趋于稳定,说明28 m掺铒光子晶体光纤对抽运光的吸收和信号光的辐射达到了平衡。当抽运功率为220 mW时,光-光转换效率达到了最大20.79%。

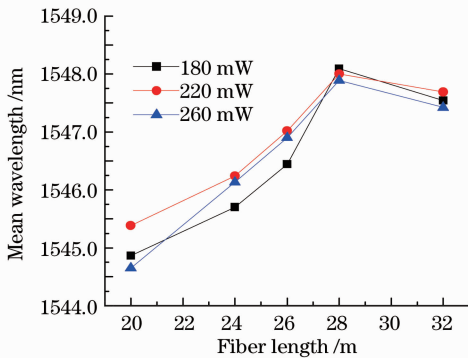


图3 平均波长随光纤长度的变化

Fig. 3 Mean wavelength versus fiber length

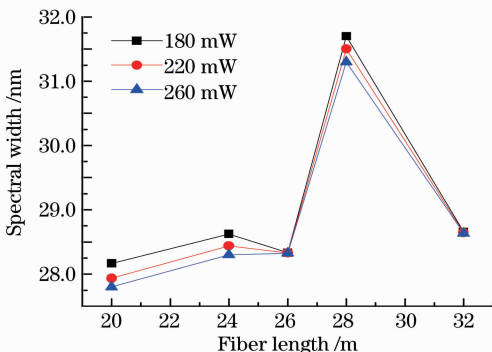


图4 光谱带宽随光纤长度的变化

Fig. 4 Spectral width versus fiber length

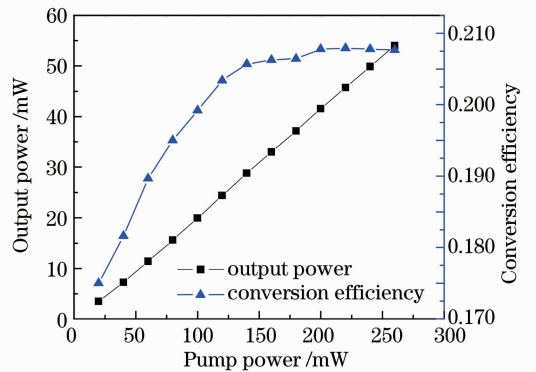


图5 输出功率和光-光转换效率随抽运功率的变化

Fig. 5 Output power and optical-to-optical conversion efficiency versus pump power

图6给出了抽运功率对掺铒光子晶体光纤超荧光光源平均波长和光谱谱宽的影响。当抽运功率0~120 mW时,光源的平均波长随抽运功率增加而逐渐向长波长方向漂移。这主要是由于铒离子的发射谱具有双峰结构(1530 nm和1560 nm),并且在1530 nm和1560 nm处对光增益具有竞争,抽运功率较小时,1530 nm峰表现为主要增益,随着抽运功率的增加,1560 nm峰增益逐渐增加,从图7光源输出谱中可以看出,1560 nm峰值谱功率的增加幅度要大于1530 nm,说明1560 nm峰增益随抽运功率的增加而增大。当抽运功率大于120 mW,平均波长随抽运功率的增加而非常缓慢的向短波方向漂移,这是由于光

纤在 28 m 定值长度下, 1530 nm 和 1560 nm 峰在增益竞争中, 1530 nm 峰依然表现为主要增益, 同样从图 7 中看出, 在抽运功率大于 120 mW 后, 1560 nm 峰增益幅度小于 1530 nm 峰的增益幅度, 并且在光源输出光谱中 1530 nm 峰始终高于 1560 nm 峰。

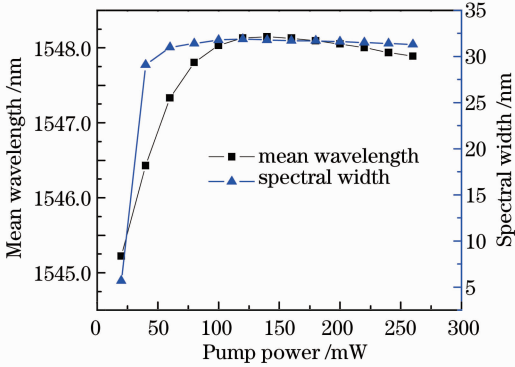


图 6 平均波长和光谱带宽随抽运功率的变化

Fig. 6 Mean wavelength and spectral width versus pump power

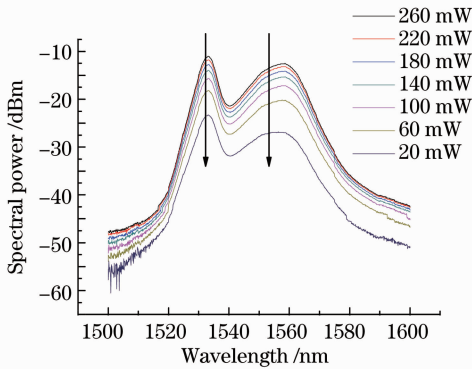


图 7 光源光谱随抽运功率的变化

Fig. 7 Spectra of fiber source versus pump power

图 6 还可看出, 抽运功率在 40~260 mW 之间变化时, 光源的谱宽大于 30 nm。另外, 抽运功率在 120~240 mW 之间变化时, 光源的谱宽和平均波长受抽运功率的影响非常小, 而图 7 中抽运功率 140, 180 和 220 mW 时的光源光谱谱型基本不变, 正是说明了这点, 因为光谱谱宽和平均波长反映的是光源输出光谱谱型的信息。

最后通过对比分析不同抽运功率下光源的输出功率、光-光转化效率、谱宽和光谱谱型, 选定抽运功率 220 mW, 最终获得掺铒光子晶体光纤超荧光光源样机的输出特征参数为: 输出功率为 45.74 mW, 光-光转换效率为 20.79%, 谱宽为 31.5 nm, 平均波长为 1548.003 nm。

## 4 结 论

提出了基于掺铒光子晶体光纤的超荧光光源。实验研究了单程后向结构掺铒光子晶体光纤超荧光光源的输出特性并分析了掺铒光子晶体光纤长度和抽运功率对光源输出特征参数的影响。优化选择抽运功率 220 mW, 抽运 28 m 掺铒光子晶体光纤, 获得了输出功率 45.74 mW, 光-光转换效率 20.79%, 谱宽 31.5 nm, 平均波长 1548.003 nm 超荧光光纤光源样机。为进一步研究掺铒光子晶体光纤超荧光光源的稳定性及环境适应性等特性奠定基础。

## 参 考 文 献

- 1 P. F. Wysocki, M. J. F. Digonnet, B. Y. Kim *et al.*. Characteristics of erbium-doped superfluorescent fiber sources for interferometric sensor applications [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1994, **12**(3): 550~567
- 2 D. C. Hall, W. K. Burns, R. P. Moeller. High-stability Er<sup>3+</sup> doped superfluorescent fiber sources [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(7): 1452~1460
- 3 Wang Xiulin, Huang Wencai, Huang Xiaojing *et al.*. A novel mean wavelength stability and high efficiency L-band superfluorescent fiber source [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3): 647~652  
王秀琳, 黄文财, 黄晓菁等. 新型中心波长稳定的高效率 L 波段掺铒光纤超荧光光源 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(3): 647~652
- 4 J. H. Lee, E. J. Jung, C. S. Kim. Optical coherence tomography based on a continuous-wave supercontinuum seeded by erbium-doped fiber's amplified spontaneous emission [J]. *J. Opt. Soc. Korea*, 2010, **14**(1): 49~54
- 5 D. G. Falquier, M. J. F. Digonnet, H. J. Shaw. A polarization-stable Er-doped superfluorescent fiber source including a Faraday rotator mirror [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(11): 1465~1467
- 6 S. V. Frolov, A. Paunescu. Waveguide-based broadband source for optical gyroscopes [J]. *Electron. Lett.*, 2005, **1**(22): 1242
- 7 P. Ou, B. Cao, C. X. Zhang *et al.*. Er-doped superfluorescent fibre source with enhanced mean-wavelength stability using chirped fiber grating [J]. *Electron. Lett.*, 2008, **44**(3): 187~189
- 8 A. Wang, P. Ou, L. S. Feng *et al.*. High-stability Er-doped superfluorescent fiber source incorporating photonic bandgap fiber [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2009, **21**(24): 1843~1845
- 9 Song Meimei, Feng Sujuan, Mao Qinghe. Influences of pump schemes on gain properties of L-band double-pass erbium-doped fiber amplifiers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 681~685  
宋梅梅, 冯素娟, 毛庆和. 抽运方案对 L 波段双通掺铒光纤放大器增益特性的影响 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(3): 681~685
- 10 B. Stéphane, K. K. Hyang, J. F. D. Michel *et al.*. Reduced thermal sensitivity of a fiber-optic gyroscope using an air-core photonic-bandgap fiber [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2007, **25**(3): 861~865
- 11 T. Mura, K. Nagao, K. Saitoh *et al.*. Design principle for realizing low bending losses in all-solid photonic bandgap fibers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2011, **29**(16): 2428~2435
- 12 Geng Pengcheng, Zhang Weigang, Zhang Shanshan *et al.*. Design of new type single-polarization single-mode photonic crystal fiber with wide bandwidth [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(7): 0706001  
耿鹏程, 张伟刚, 张珊珊等. 新型宽带单偏振单模光子晶体光纤

- 的设计[J]. 光学学报, 2011, **31**(7): 0706001
- 13 T. Matsui, J. Zhou, K. Nakajima. Dispersion-flattened photonic crystal fiber with large effective area and low confinement loss [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(12): 4178~4183
- 14 Wang Dan, Zheng Yi. Numerical simulation and analysis of double cladding photonic crystal fiber with flattened dispersion [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0806010  
王丹, 郑义. 双包层色散平坦光子晶体光纤的数值模拟与分析[J]. 光学学报, 2011, **31**(8): 0806010
- 15 Li Honglei, Lou Shuqin, Guo Tieying *et al.*. Low loss fusion splicing of germanium doped core photonic crystal fiber and standard single mode fiber[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(6): 1589~1593  
李宏雷, 娄淑琴, 郭铁英等. 掺锗芯光子晶体光纤和普通单模光纤的低损耗熔接[J]. 中国激光, 2010, **37**(6): 1589~1593
- 16 Liu Chengxiang, Zhang Li, Wu Xu *et al.*. Coupling technique of photonic crystal fiber [J]. *J. Chin. Inertial Technol.*, 2009, **17**(3): 366~369  
刘承香, 张力, 吴旭等. 光子晶体光纤的耦合技术[J]. 中国惯性技术学报, 2009, **17**(3): 366~369

栏目编辑：韩峰