

# 平均波长和输出功率稳定性高的掺铒光子晶体光纤 超荧光光源的实验研究

辛璟焘 张海涛\* 郝 赫 巩马理

清华大学精密仪器系, 北京 100084

**摘要** 采用掺铒光子晶体光纤代替传统掺铒光纤来提高超荧光光纤光源输出的功率稳定性和平均波长稳定性。在 $-45^{\circ}\text{C}\sim 70^{\circ}\text{C}$ 的全温区范围内,对超荧光光纤光源的光纤长度和半导体激光器(LD)抽运功率进行优化,并提出了用插值法进行LD抽运功率的优化方法,在光纤长度优化的基础上,高效、精确地优化了抽运功率,改善了光源的平均波长稳定性。经过优化的光源,在 $-45^{\circ}\text{C}\sim 70^{\circ}\text{C}$ 的全温区范围内平均波长变化量为 $0.67\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ,输出功率稳定性为0.37%。

**关键词** 光纤光学; 超荧光光纤光源; 平均波长稳定性; 光子晶体光纤

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0405002

## Experiment Study of High Mean Wavelength and Output Power Stability Erbium-Doped Photonic Crystal Fiber Superfluorescent Source

Xin Jingtao Zhang Haitao Hao He Gong Mali

Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China

**Abstract** Erbium-doped photonic crystal fibers (EDPCFs) are used to improve the output power and mean wavelength stability of the superfluorescent fiber source (SFS) instead of common erbium-doped fiber. Fiber length and pump power are both optimized at a large temperature range from  $-45^{\circ}\text{C}$  to  $70^{\circ}\text{C}$ . An interpolate-fitting method is used to optimize the pump power efficiently and precisely when the fiber length is optimized firstly. From  $-45^{\circ}\text{C}$  to  $70^{\circ}\text{C}$ , the mean wavelength variation of the SFS is  $0.67\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ , and the output power variation is 0.37%.

**Key words** fiber optics; superfluorescent fiber source; mean-wavelength stability; photonic crystal fiber

**OCIS codes** 060.2310; 060.2410; 060.2390; 300.2140

### 1 引 言

光纤陀螺要求光源具有很高的平均波长稳定性来保证标度因数稳定性<sup>[1]</sup>。目前,惯导级高精度光纤陀螺要求其标度因数稳定性达到 $10^{-6}$ ,这对超荧光光源的平均波长稳定性提出了很高要求。超辐射发光二极管(SLD)具有输出功率高、光谱宽等优点,但其热稳定性差,平均波长变化率达 $4\times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$ ,只适用于中、低精度的光纤陀螺。掺铒超荧光光纤光源(SFS)不仅具有输出功率高、光谱宽等特点,而且热稳定性很好,平均波长变化率小于 $1\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ,若将其工作范围扩展到 $-45^{\circ}\text{C}\sim 70^{\circ}\text{C}$ 的全温区仍能保证优异的平均波长稳定性,使其在惯导级高精度光纤陀螺中获得更广泛的应用。

掺铒SFS的平均波长主要由5个因素影响:铒纤温度、抽运功率、抽运波长、抽运偏振态和返回光<sup>[2-3]</sup>。其中后两项因素的影响可通过在掺铒SFS中加入法拉第旋转镜(FRM)<sup>[4-5]</sup>、高隔离度隔离器(ISO)<sup>[2,6]</sup>等方法减小至 $10^{-6}$ 水平。目前,已有在SFS中加入长周期光纤光栅<sup>[7]</sup>、啁啾光纤光栅<sup>[8]</sup>、光子禁带光纤<sup>[9]</sup>、高斯滤波片<sup>[10]</sup>以及掺铒光子晶体光纤<sup>[11]</sup>等方法来提高平均波长稳定性。另外,随着外界环境温度范围的增大,实现SFS平均波长

收稿日期: 2014-09-11; 收到修改稿日期: 2014-11-21

基金项目: 国家自然科学基金(61077034)

作者简介: 辛璟焘(1980—),男,助理研究员,主要从事超荧光光纤光源方面的研究。E-mail: xinjingtao@mail.tsinghua.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: zhanghaitao@mail.tsinghua.edu.cn

高稳定输出就越困难。2012年, Wu等<sup>[11]</sup>在研究超荧光光纤光源时,在-20℃~+60℃的温度内测得的光源平均波长稳定性为 $1.03 \times 10^{-5}$ ,但是相同的光源在-40℃~+60℃的温度范围内光源的平均波长稳定性增大了一倍,达到 $2.07 \times 10^{-5}$ 。总之,温度范围越小,优化的结果越好;随着工作温度范围的扩大,逐渐逼近器件材料的极限工作温度,此时,高低温区两端很小的温区范围扩大,也会使平均波长稳定性快速恶化,使系统的优化平衡更加困难。但是,在很多应用领域,环境温度变化范围会大于100℃,因此,限制了SFS的应用。

本文在-45℃~70℃全温区范围对超荧光光纤光源的系统结构参数进行优化。分别优化了光纤长度和半导体激光器(LD)抽运功率。提出了用插值法进行LD抽运功率的优化方法,实现了在光纤长度优化的基础上,高效、精确优化抽运功率,进而改善光源的平均波长稳定性。

## 2 基于光子晶体光纤的光源结构

掺铒光纤作为超荧光光纤光源最为关键的增益媒介和传输部件,其性能直接影响着光源的输出特性,因此采用性能稳定的掺铒光纤是提升光源稳定性的有效途径之一。近些年出现的新型光纤——光子晶体光纤,相比于传统光纤,在温度特性、弯曲特性、传输特性等方面具有明显优势。因此,采用掺铒光子晶体光纤(EDPCF)代替传统光纤进行实验研究。实验中所使用的掺铒光子晶体光纤是武汉烽火藤仓有限公司提供的,图1为光纤截面的扫描电镜图(SEM)。光纤包层中含有7层空气孔,空气孔直径约为 $2.0 \mu\text{m}$ ,孔间距约为 $4.0 \mu\text{m}$ ,纤芯中掺铒区域直径约为 $6 \mu\text{m}$ ,在980 nm和1550 nm的吸收系数分别为5.7 dB/m和13.6 dB/m。

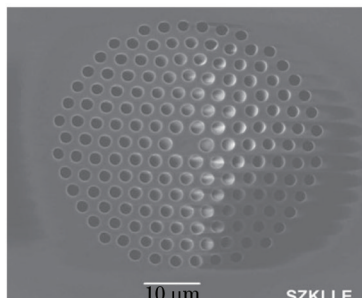


图1 掺铒光子晶体光纤截面扫描电镜图

Fig.1 Scanning electron micrograph of the EDPCF

实验中采用了双程前向光源结构。如图2(a)所示,整个系统由抽运源(LD)、波分复用器(WDM)、EDPCF、FRM和ISO构成。LD输出的抽运光通过WDM进入EDPCF后被吸收,其中产生的后向超荧光被放大后经过FRM反射后重新进入EDPCF被继续放大,并与产生的前向超荧光一起通过ISO输出。

实验中使用的是Oclaro公司提供的LC95ZKH74P-20R型LD,其输出尾纤中带有稳定抽运波长的双光纤光栅;抽运驱动器是Thorlabs公司的ITC4001型电流及温度控制模块(电流稳定性为0.002%温控精度为0.001℃)。目前,可实现LD输出的功率稳定性为0.66%。抽运波长变化量小于0.15 nm。

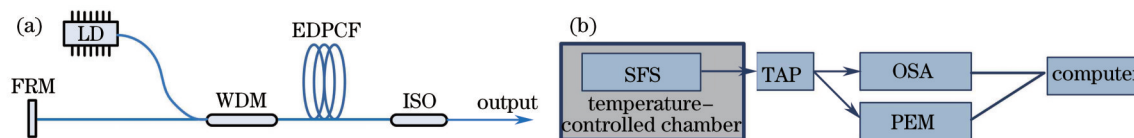


图2 掺铒光子晶体光纤超荧光光源实验装置。(a)光源结构;(b)测试装置

Fig.2 Experimental setup of the EDPCF-based SFS. (a) Structure of SFS; (b) measuremental setup

高低温环境测试装置如图2(b)所示,SFS输出经过分束器(TAP)(分光比为5:95)。将分束器输出端光纤通过裸纤适配器分别与偏振消光比测试仪(PEM)和光谱仪(OSA)连接进行测试,其中5%功率输出端与偏振消光比测试仪连接测试,95%功率输出端与光谱仪连接测试。光谱仪由安捷伦公司生产,测量范围600~1700 nm,最高精度可达0.01 nm。偏振消光比测试仪,可实现50 dB的偏振消光比测量和-30 dBm~10 dBm范围内的功率测量。光谱仪及偏振消光比测试仪均通过 GPIB-USB 线与计算机连接,使得计算机可以实时记录光纤光源输出的光谱、偏振消光比及功率信息。光谱仪采集的光谱信息传入计算机后经过 LABVIEW 软件进行数据处理后可计算出平均波长和平均波长稳定性等光源技术指标,其定义和计算方法如下:

1) 超荧光光纤光源的平均波长是以功率为权重计算得到的,可表示为

$$\bar{\lambda} = \frac{\sum_{i=1}^n P(\lambda_i) \cdot \lambda_i}{\sum_{i=1}^n P(\lambda_i)}, \quad (1)$$

式中  $\lambda_i$  为将输出光谱分割后第  $i$  个点处对应的波长,  $P(\lambda_i)$  为波长  $\lambda_i$  处的光功率密度,  $\Delta\lambda_i$  为光谱分割后第  $i$  段的谱宽;

2) 超荧光光纤光源的平均波长稳定性的计算公式可表示为

$$\Delta\bar{\lambda} = 2 \times \frac{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}{\lambda_{\max} + \lambda_{\min}}, \quad (2)$$

式中  $\lambda_{\max}$  为在该时间范围内测得的超荧光光纤光源平均波长的最大值,  $\lambda_{\min}$  为该时间范围内平均波长的最小值。

### 3 光纤长度的优化

将烽火藤仓公司提供的 34 m 样纤分成两部分, 14 m 和 20 m。先用 20 m 光纤进行一次实验, 然后用 14 m 光纤进行接下来的实验, 光纤长度不断减小。

为了测试在不同光纤长度时, 温度对光源平均波长稳定性的影响, 将光源(除了 LD 和 LD 驱动模块)置于高低温箱中, 温度范围为  $-45\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。1) 将抽运功率设定为 80 mW, 抽运源管芯温度控制在  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。当光纤光源系统在室温条件下输出稳定后, 将高低温箱从室温  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  降到  $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 在  $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$  保温 30 min; 2) 设置温箱温度为  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 整个升温过程约为 20 min, 到达  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  后, 保温 30 min; 3) 在不同光纤长度情况下, 重复上述过程。光谱仪每 6 s 进行一次扫描, 并向计算机传输一次光谱信息, 进而可以通过 LABVIEW 软件计算一次平均波长。从一次温度循环中挑选出平均波长最大值和最小值就可计算出特定光纤长度时光源的平均波长变化量。最后即可绘制出平均波长变化量随光纤长度的变化曲线, 如图 3 所示。可以看出, 随着光纤长度的增加, 光源输出超荧光的平均波长变化量减小, 在 7 m 左右达到最小值, 然后迅速增大, 到 11 m 左右再次缓慢减小。因此应该在 7 m 左右对光纤长度进行进一步的优化。

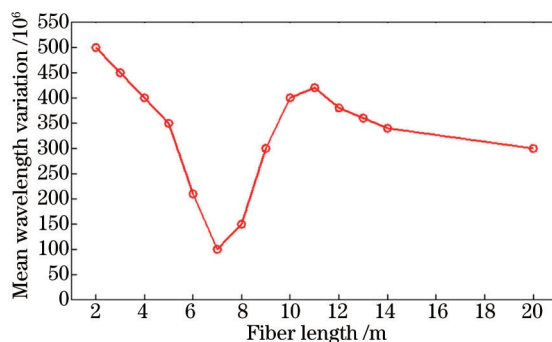


图 3 实验测得光源平均波长稳定性随光纤长度的变化趋势

Fig.3 Measured mean wavelength variation of SFS against fiber length

### 4 LD 抽运功率的优化

上述仅对光纤长度进行了大致的优化, 并未对抽运功率进行优化。因此, 将光纤长度从 7.5 m 开始进行进一步的优化的同时, 进行抽运功率的优化。为了加快优化的速度, 将全温区分成 12 个温度点 ( $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ )。在各个温度点改变 LD 的驱动功率, 进行平均波长和输出功率的测量。SFS 输出平均波长随温度变化曲线如图 4 所示, 可以看出, 当抽运功率较小时, 平均波长随温度的变化曲线呈左高右低, 向下倾斜状; 随着抽运功率的增加, 倾斜程度减小, 曲线逐渐变成向上凸起的抛物线状。当两个端点的值接近时, 平均波长变化量较小。从图中也可以看出, 抽运功率越大, 平均波长越小, 并且抽运功率相近的两条曲线无交叠, 因此可以用线性插值法拟合出介于这两个

抽运功率之间、不同抽运功率下,平均波长随温度的变化曲线。通过插值,可以得到足够多的给定抽运功率下平均波长随温度的变化曲线,进而可以计算出某一抽运功率下的全温区SFS平均波长变化量。选择的插值间隔是1 mW,图5为光纤长度为7.5 m时,在-45 °C~70 °C温度范围内,平均波长变化量随抽运功率变化的曲线。可以看出抽运功率对平均波长稳定性影响很大,只有选择合适的抽运功率才能减小光源输出平均波长的变化量。因此,仅通过优化光纤长度来改善光源平均波长稳定性是不够的。从图5可以看出,抽运功率在155 mW时,平均波长变化量最小( $1.8 \times 10^{-4}$ 左右)。另外,可以预见平均波长变化量随抽运功率变化的曲线呈抛物线形(后续研究得到进一步证实)。

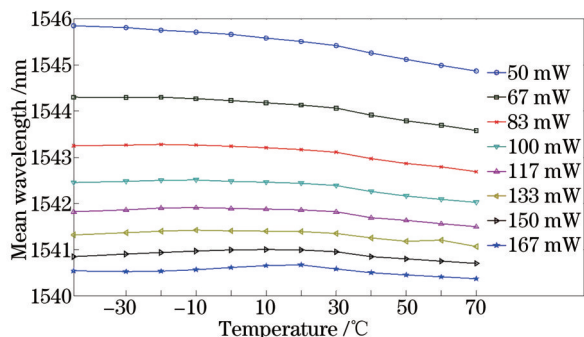


图4 光纤长度为7.5 m时,不同抽运功率下,平均波长随温度的变化曲线

Fig.4 Measured mean wavelength variation of the SFS against temperature with different pump powers at fiber length of 7.5 m

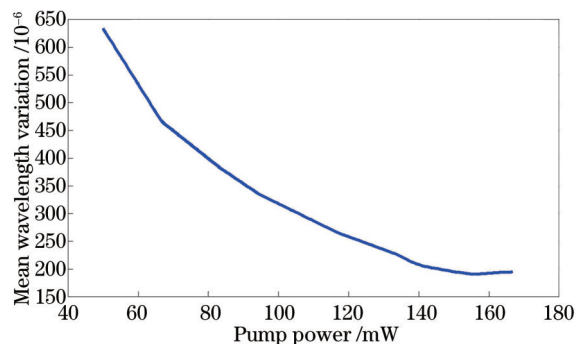


图5 光纤长度为7.5 m时,平均波长随LD抽运功率变化的插值拟合曲线

Fig.5 Fitted mean wavelength variation of the SFS against pump power at fiber length of 7.5 m

将光纤长度减小到7.2 m进行实验研究。图6为光纤长度为7.2 m时,-45 °C~70 °C温度范围内,SFS输出平均波长随温度变化曲线。利用前述插值拟合方法,可以绘制出平均波长变化量随抽运功率变化的曲线,如图7所示,可见平均波长变化量随抽运功率变化的曲线呈抛物线形,LD功率为73 mW时,平均波长稳定性达到最小值 $7.6 \times 10^{-5}$ 。

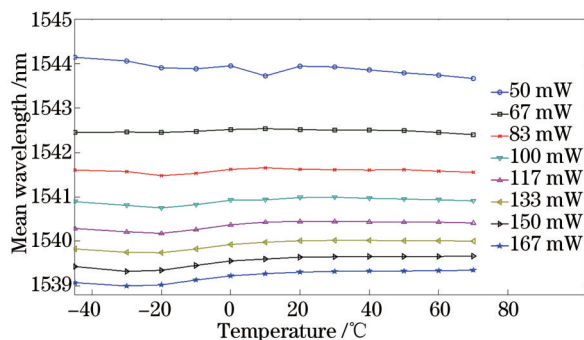


图6 光纤长度为7.2 m时,不同抽运功率下,平均波长随温度的变化曲线

Fig.6 Measured mean wavelength variation of the SFS against temperature with different pump powers at fiber length of 7.2 m

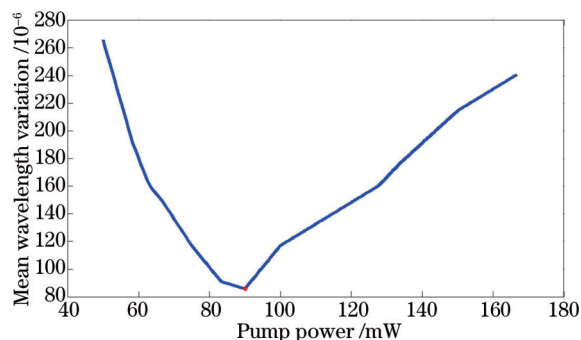


图7 光纤长度为7.2 m时,平均波长随LD抽运功率变化的插值拟合曲线

Fig.7 Fitted mean wavelength variation of the SFS against pump power at fiber length of 7.2 m

进一步减小光纤长度到7.0 m,图8为光纤长度为7.0 m时,SFS输出平均波长随温度变化曲线。图9为平均波长变化量随抽运功率变化的曲线,同样呈抛物线形,当LD功率为90 mW时,平均波长稳定性达到最小值 $8.6 \times 10^{-5}$ 。

由上面的结果可知,对应特定光纤长度有一个最优的LD抽运功率。当经过优化后的光纤长度为7.2 m时,LD抽运功率为73 mW。其中,73 mW的最优抽运功率是通过插值计算得到的,因此将光纤长度设定在7.2 m,抽运功率设定在73 mW进行实验。图10为光谱仪在室温下采集到的光谱,图11为平均波长和输出功率随温度变化的曲线。其中输出功率整体上是随着温度增加略有减小,但是变化很小,在115 °C的温度范围内功率稳定性为0.37%,这一点是常规光纤无法比拟的。平均波长稳定性为 $7.75 \times 10^{-5}$ ,与插值后计算结果基

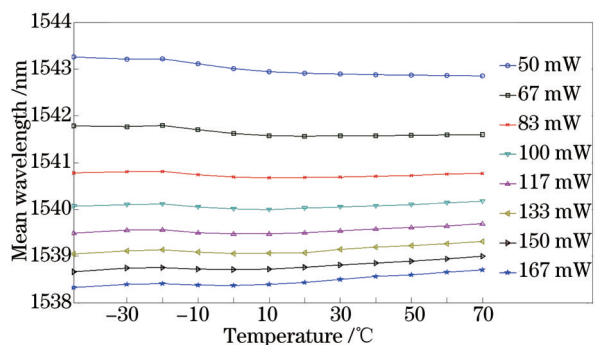


图8 光纤长度为7.0 m时,不同抽运功率下,平均波长随温度的变化曲线

Fig.8 Measured mean wavelength variation of the SFS against temperature with different pump powers at fiber length of 7.0 m

本一致,因此,采用插值算法优化抽运功率的方法是可行的。因此,可以以较大的抽运功率间隔进行温度循环实验,然后进行插值,计算出最优抽运功率后,然后再在最优抽运功率附近进行实验研究。这样做可以大大减少实验工作量,同时可以保证很好的实验结果。

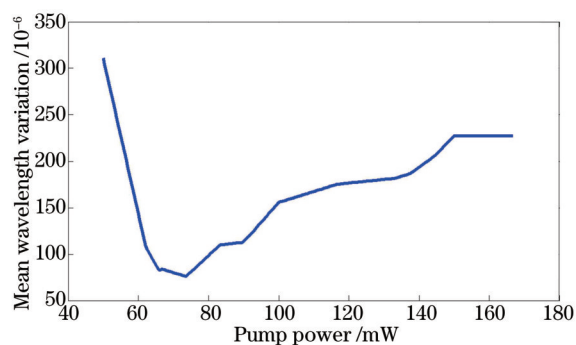


图9 光纤长度为7.0 m时,平均波长随LD抽运功率变化的插值拟合曲线

Fig.9 Fitted mean wavelength variation of the SFS against pump power at fiber length of 7.0 m

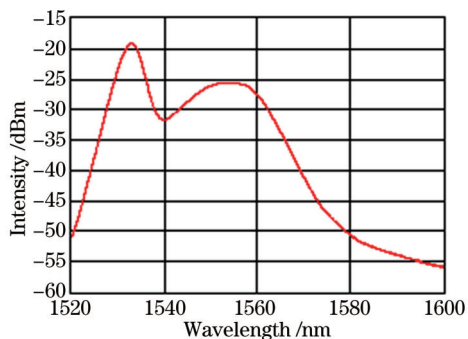


图10 光纤长度为7.2 m,抽运功率为73 mW时的光谱  
Fig.10 Spectrum of the SFS at fiber length of 7.2 m and pump power of 73 mW

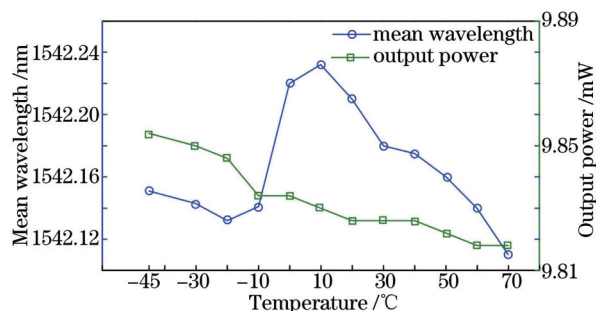


图11 光纤长度为7.2 m,抽运功率为73 mW时,平均波长和输出功率随温度变化的曲线

Fig.11 Measured mean-wavelength and output power of the SFS against temperature at fiber length of 7.2 m and pump power of 73 mW

## 5 结 论

为满足惯导级光纤陀螺对光纤光源输出特性的要求,基于双程前向结构SFS,采用掺饵光子晶体光纤代替传统光纤,在-45 °C~70 °C全温区范围对整个光源系统结构进行优化,实现了功率和平均波长的高稳定输出。通过优化,采用的优化参数为光纤长度为7.2 m,LD抽运功率为73 mW,实现了SFS输出功率为9.8 mW,功率稳定性为0.37%,光源平均波长变化量为 $0.67 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 的综合技术指标。

## 参 考 文 献

- Bergh R A, Lefevre H C, Shaw H J. An overview of fiber-optic gyroscopes[J]. J Lightwave Technol, 1984, 2(2): 91-107.
- Wysocky P F, Digonnet M J F, Kim B Y, et al.. Characteristics of erbium-doped superfluorescent fiber sources for interferometric sensor applications[J]. J Lightwave Technol, 1994, 12(3): 550-567.
- Mazurczyk V J, Zyskind J L. Polarization dependent gain in erbium doped-fiber amplifiers[J]. Photon Technol Lett, 1994, 6(5): 616-618.
- Falquier D G, Digonnet M J F, Shaw H J. A polarization-stable Er-doped superfluorescent fiber source including a Faraday rotator mirror[J]. Photon Technol Lett, 2000, 12(11): 1465-1467.
- Wang L A, Lee C T, You G W. Polarized erbium-doped superfluorescent fiber source utilizing double-pass backward configuration [J]. Appl Opt, 2005, 44(1): 77-82.

- 6 Hall D C, Burns W K, Moeller R P. High-stability Er-doped superfluorescent fiber sources[J]. J Lightwave Technol, 1995, 13(7): 1452-1460.
- 7 Patrick H J, Kersey A D, Burns W K, *et al.*. Erbium-doped superfluorescent fibre source with long period fibre grating wavelength stabilization[J]. Electronics Letters, 1997, 33(24): 2061-2063.
- 8 Ou P, Cao B, Zhang C X, *et al.*. Er-doped superfluorescent fibre source with enhanced mean-wavelength stability using chirped fibre grating[J]. Electronics Letters, 2008, 44(3): 187-189.
- 9 Wang A, Ou P, Feng L S, *et al.*. High-stability Er-doped superfluorescent fiber source incorporating photonic bandgap fiber[J]. Photon Technol Lett, 2009, 21(24): 1843-1845.
- 10 Wang A. High stability Er-doped superfluorescent fiber source improved by incorporating bandpass fiber[J]. Photon Technol Lett, 2011, 23(4): 227-229.
- 11 Wu X, Ruan S C, Liu C X, *et al.*. High-stability erbium-doped photonic crystal fiber source[J]. Appl Opt, 2012, 51(13): 2277-2281.

栏目编辑: 王晓琰