

# 高功率高效率掺铒光纤超荧光光源

张 力<sup>1</sup> 刘承香<sup>2</sup> 阮双琛<sup>2</sup> 钱恭斌<sup>1</sup> 吴 旭<sup>2</sup>

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

**摘要** 优化设计了高功率、高效率掺铒光纤超荧光光源的参数。采用商用掺铒光纤, 针对双程后向结构, 首先仿真了光源输出功率和带宽随掺铒光纤长度的变化, 并用对等实验验证了模拟结果, 初步确定掺铒光纤长度的优化范围; 理论研究了反射镜反射率对光源性能的影响, 计算出最佳反射率并模拟了该反射率下光源的输出光谱; 实验研究了抽运功率对光源平均波长的影响, 确定了优化的抽运功率范围, 并进一步确定了掺铒光纤的优化长度。实验选用 110 mW 抽运功率, 13.74 m 掺铒光纤, 获得了输出功率为 46.9 mW 的高功率光纤光源, 其抽运转换效率可达 42.6%, 且光源保持了约 34.54 nm 的宽带宽。

**关键词** 光纤光学; 超荧光; 掺铒光纤光源; 双程后向; 高功率; 高效率

**中图分类号** TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.060604

## High-Power, High Efficiency Erbium-Doped Superfluorescent Fiber Source

Zhang Li<sup>1</sup> Liu Chengxiang<sup>2</sup> Ruan Shuangchen<sup>2</sup> Qian Gongbin<sup>1</sup> Wu Xu<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> College of Information Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China  
<sup>2</sup> Shenzhen Key Laboratory of Laser Engineering, College of Electronic Science and Technology, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China)

**Abstract** The optimization parameters of high-power, high-efficiency erbium-doped superfluorescent fiber source are designed. Using commercial erbium-doped fiber, focusing on the double-pass backward architecture, the influences of the fiber length on output power and spectrum width of fiber source are simulated firstly. Then the corresponding experiments are done to validate the simulation results, thus to confirm the initial optimization fiber length ranges. The influences of reflectivity on fiber source performance are studied theoretically. The optimized reflectivity is calculated and the output spectra of fiber source under this reflectivity are simulated. The influences of pump power on mean wavelength are studied experimentally and the optimized pump power is confirmed, and thus the final optimized fiber length is further achieved. With 110 mW pump power and 13.74 m fiber length, we obtain the high power fiber source of 46.9 mW with the pump efficiency as high as 42.6% and the spectrum width of 34.54 nm.

**Key words** fiber optics; superfluorescence; erbium-doped fiber source; double-pass backward; high-power; high efficiency

**OCIS codes** 060.2340; 060.2410; 140.6630; 230.2285

## 1 引言

光纤超荧光光源(SFS)通过在光纤中掺杂不同的稀土元素,如  $\text{Er}^{3+}$ 、 $\text{Nd}^{3+}$ 、 $\text{Yb}^{3+}$  等,产生放大自发辐射(ASE)即超荧光,从而可灵活获得不同波段的超荧光输出以满足不同的应用。其中掺铒光纤超荧光光源(EDSFS)由于具有温度稳定性好、输出功率高、荧光谱线宽、使用寿命长、易于与单模光纤耦合等优点,在光纤传感、光学精密测量、光探测、医学诊断等领域得到了广泛应用<sup>[1~3]</sup>。另外,人们基于掺铒光纤展开了光纤

收稿日期: 2012-01-19; 收到修改稿日期: 2012-03-08; 网络出版日期: 2012-05-05

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

作者简介: 张 力(1971—),女,博士,讲师,主要从事光纤通信方面的研究。E-mail: zhang\_li@szu.edu.cn

激光器、光纤放大器等相关研究<sup>[4,5]</sup>。具体到光纤光栅传感器的应用,掺铒光纤超荧光光源需要解决的关键问题是在增加光源带宽的同时,提高光源的输出功率、平坦度和稳定性<sup>[6]</sup>。郭小东等<sup>[7]</sup>通过优化掺铒光纤参数、光纤长度及抽运光功率,获得了输出光功率高达 29.4 mW 的单程后向结构光纤光栅传感器用光源,抽运光功率约为 120 mW,抽运转换效率约为 24.5%。黄文财等<sup>[8]</sup>利用 980 nm 半导体激光器作抽运源,获得了输出功率为 26 mW 的双程后向结构光纤光源,抽运转换效率约为 29.4%。陈胜平等<sup>[9]</sup>采用光纤反射环形镜构建双程后向结构掺铒光纤光源,得到了 30.6 mW 的超荧光输出,相应的抽运转换效率为 42.0%。本文着眼于掺铒光纤超荧光光源的输出光功率指标,应用商用掺铒光纤,探讨了光源主要参数的优化设计方法,采用理论模拟结合实验研究,优化了掺铒光纤的长度、反射镜的反射率以及抽运源的抽运功率,兼顾光源的带宽和平均波长指标,获得了高功率、宽带宽、高抽运转换效率的双程后向结构光纤超荧光光源。

## 2 掺铒光纤光源的主要参数

掺铒光纤光源的主要参数有输出功率  $P$ 、带宽  $\Delta\lambda$  和平均波长  $\bar{\lambda}$ ,另外常用抽运转换效率  $\eta$  衡量光源的效率。

文献<sup>[10]</sup>中描述掺铒光纤超荧光光源的带宽有积分带宽和 3 dB 带宽两种,因为超荧光光源的输出是多峰结构,用 3 dB 带宽并不适合,而用积分带宽则比较理想,本文也采用积分带宽描述光源的带宽指标。积分带宽的计算公式为

$$\Delta\lambda = \left[ \int p(\lambda) d\lambda \right]^2 / \int p^2(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

式中  $p(\lambda)$  为光源功率谱密度。

平均波长是掺铒光纤光源非常关键的参数,定义为以光源功率谱密度作为加权因子对波长进行加权平均<sup>[10]</sup>:

$$\bar{\lambda} = \int \lambda p(\lambda) d\lambda / \int p(\lambda) d\lambda. \quad (2)$$

抽运转换效率定义为光源输出光功率  $P_{\text{out}}$  和抽运源所提供的功率  $P_{\text{pump}}$  之比:

$$\eta = P_{\text{out}} / P_{\text{pump}}. \quad (3)$$

## 3 掺铒光纤光源参数的优化

根据抽运光注入方向和信号光输出方向的异同以及光纤两端是否加反射镜,掺铒光纤超荧光光源可分为单程前向、单程后向、双程前向和双程后向等 4 种不同的结构。在双程结构光源中,由于存在双程增益,效率高,其输出功率、谱宽和平均波长稳定性都能通过参数优化得到改善<sup>[11]</sup>,容易满足光纤光栅传感系统和许多高功率光源应用的需要,尤其是双程后向结构光纤光源具有更高的转换效率,是光纤传感器光源较理想的候选者。本文主要针对双程后向掺铒光纤光源展开研究,选用的掺铒光纤为 Corning 公司的 Er1550C3,其主要参数为:数值孔径约 0.23,模场直径为  $(5.4 \pm 0.4)$  nm,980 nm 处的峰值吸收系数大于等于 2.5 dB/m,1530 nm 处的峰值吸收系数为 5.0~10.0 dB/m,铒离子的掺杂浓度(格位浓度,即每立方厘米中有多少个激活离子)约为  $0.59 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 。使用 980 nm 半导体激光器作为抽运源,采用自主研发的驱动电路提供抽运源的恒流和恒功率控制。

### 3.1 掺铒光纤长度的优化

掺铒光纤作为光纤超荧光光源的增益介质,其长度对光源的输出功率、平均波长和带宽及光谱形状都有很大的影响,因此要获得高性能的光源,必须针对应用的不同要求对掺铒光纤的长度进行优化。借助自主研发的掺铒光纤超荧光光源模拟软件<sup>[12]</sup>,输入光纤的参数可仿真计算光源的各项输出指标,以指导选取光纤的优化长度。在光纤传感器应用中要同时考虑光源的输出功率和带宽,因此掺铒光纤长度的优化主要针对这两项指标。掺铒光纤长度的优化从理论模拟和实验两方面入手。图 1 实线所示为仿真抽运功率取 100 mW 时,双程后向光源输出功率、带宽随长度的变化,光源功率先随光纤长度的增加快速上升,到达最高点后基本饱和并随长度的进一步增加略微下降,而带宽基本呈对称型变化,容易确定获得光源最佳性能的光纤长度大致范围为 6~15 m。为验证理论模拟,同时做了对等实验(抽运功率取 100 mW,实验测试不同长度

下光源的输出功率和带宽),结果如图1虚线所示。可见仿真和实验测试的光源两项指标变化趋势基本相同,但仿真数值要高于实验结果,这是因为实验中由器件、熔接等引入了许多损耗,而光源模型中因为缺失某些光纤参数和损耗系数的经验值,导致仿真结果不能完全反映这些损耗。根据实验结果,获得光源最佳性能的光纤长度范围为7~17 m,这与理论模拟结果的6~15 m非常接近。这表明在优化掺铒光纤的长度时,可以首先用软件模拟初步确定光纤长度的大致范围,指导实验集中在这一范围内,兼顾光源的其他指标,逐步改变光纤长度,测试光源性能,从而最终确定掺铒光纤的优化长度。

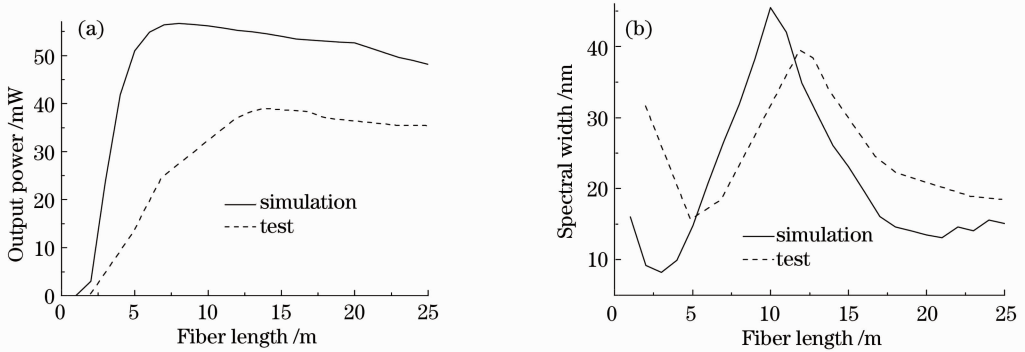


图1 光源(a)输出功率和(b)带宽随长度的变化

Fig.1 (a) Output power and (b) spectral width versus fiber length

### 3.2 反射镜反射率的优化

双程后向结构光源使用的反射镜等效地加长了光纤光源传播光的增益路径,反射镜的反射率也会影响光源的输出光谱和稳定性。由于实验条件所限,反射率对光源的影响主要采用掺铒光纤光源仿真软件来模拟。

仿真了反射率  $R$  对掺铒光纤光源输出光谱的影响。图2给出了抽运功率为 100 mW,反射率取不同值时光源的模拟光谱输出, $R=0$  作为双程后向的特例即单程后向也列入其中。可见反射率对光源光谱有明显的影响,当  $R=0.9$  时,输出光谱以长波长为主,1558 nm 附近的峰较高,1530 nm 附近没有峰出现。随着  $R$  的降低,光谱中中波长成份降低,短波长成份上升。作为极限,当  $R=0$  时,短波长处的峰明显占优势。在这一过程中,光源输出功率依次为 55.72,53.34,50.59,47.26 mW。双程后向结构光源具有固有的双峰结构,

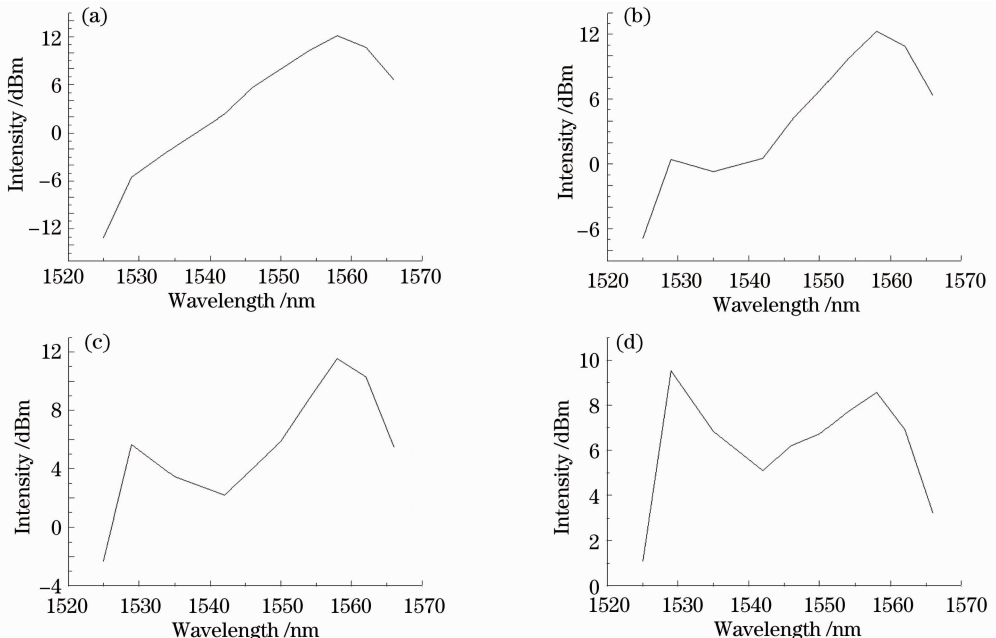


图2 不同反射率下光源的模拟输出光谱。(a)  $R=0.9$ ; (b)  $R=0.1$ ; (c)  $R=0.01$ ; (d)  $R=0$

Fig.2 Simulation spectra of fiber source for different reflectivities. (a)  $R=0.9$ ; (b)  $R=0.1$ ; (c)  $R=0.01$ ; (d)  $R=0$

当信号的长波长成分相对于短波长成分占优势时,带宽较宽,因此如果适当选取反射率,可以获得带宽较宽的光源。

已有的研究<sup>[13]</sup>表明,在不同抽运功率下,稳定单程后向光纤光源的输出谱形是相似的。对于双程后向结构光源,多了反射镜反射率可调的参数。沈林放<sup>[14]</sup>对双程后向光源的数值模拟表明,存在一临界反射率,使双程后向结构光源输出稳定,且具有较大的带宽。用自主研发的掺铒光纤超荧光光源模拟软件<sup>[12]</sup>,使用光纤Er1550C3的参数,计算出了0.0032的临界反射率。图3为反射率为0.0032,抽运功率取60~90 mW时光源输出的光谱图,可见4种抽运功率下光源谱型非常相似,表明稳定双程后向光源具有类似稳定单程后向光源的性质。对应90,80,70,60 mW抽运功率,光源的平均波长分别为1546.18,1546.34,1546.47,1546.51 nm,表明平均波长表现出了较高的稳定性。可见与单程后向结构相比,可调的反射镜反射率给双程后向光纤光源性能的优化带来了很大的方便。在抽运功率一定的条件下,可以通过选择反射率获得需要的光谱形状。

### 3.3 抽运功率的优化

光纤传感器要求掺铒光纤超荧光光源具备高功率、宽带宽,同时光源必须稳定。光源的稳定性直接影响着传感器的准确度,而稳定性由光源的平均波长这一指标反映。掺铒光纤超荧光光源的平均波长所面临的不稳定性主要来源于<sup>[15]</sup>:掺铒光纤温度效应导致的内在温度不稳定性;抽运源温度效应引起的抽运波长扰动和抽运功率扰动;光纤陀螺信号反馈导致的不稳定。因为光纤陀螺也是一种光纤传感器,所以可以将其对光源的反馈影响推广到一般的光纤传感器用光源中。要实现光纤光源的高稳定性,重点考虑抽运功率对平均波长的影响即可,因为对于传感器反馈信号引起的扰动可以通过在光源输出端加隔离器消除掉;而半导体激光器的抽运波长一般都在976 nm,该波长是铒离子980 nm吸收带的峰点位置,即只要在976 nm处抽运,可以把抽运波长扰动引起的平均波长波动降到最低。

前面已通过仿真和实验证明,优化掺铒光纤的长度和反射镜的反射率可以使光源获得较高的功率、较宽的带宽和需要的光谱形状,对于抽运功率对平均波长的影响,参考已获得的掺铒光纤优化长度范围,进行了不同光纤长度下光源平均波长受抽运功率影响的实验,结果如图4所示。可见,当抽运功率较低时,在不同长度下光源平均波长的变化规律不尽相同,但在70~110 mW之间,所有长度的光纤其平均波长变化趋于平缓,因此根据光源输出功率的要求,抽运功率的优化范围取70~110 mW比较合适,如果要得到较大的输出功率,可以考虑抽运功率取100 mW附近。从图中还可以看出,24.83 m长度下光源的平均波长变化最小,但参考图1,在这一长度下光源的带宽很窄,已降到20 nm以下,综合上述按光源功率和带宽指标的光纤优化长度,兼顾平均波长的指标,掺铒光纤的优化长度最终确定为13.74 m。

## 4 实验结果

综合前面的理论和实验研究,选取优化抽运功率110 mW,优化掺铒光纤长度13.74 m,实验获得了高功

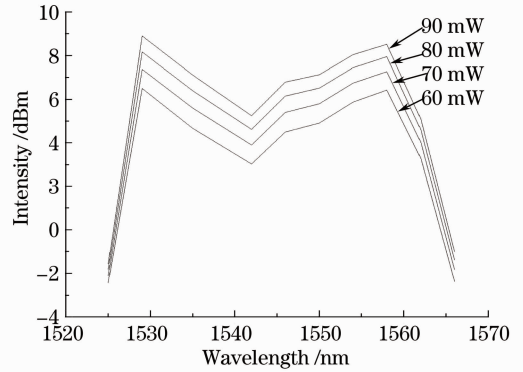


图3 不同抽运功率下稳定光源的模拟输出光谱, $R=0.0032$

Fig. 3 Simulation output spectra of steady fiber source for different pump powers with  $R=0.0032$

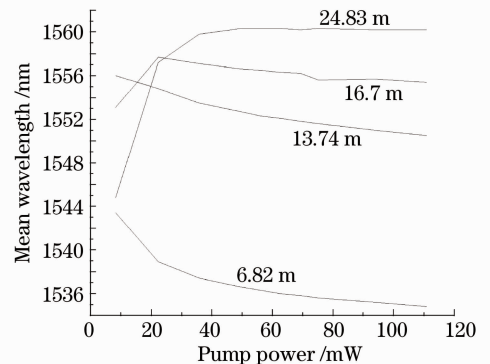


图4 不同掺铒光纤长度下光源平均波长随抽运功率的变化

Fig. 4 Mean wavelength versus pump power under different fiber lengths

率、高效率双程后向掺铒光纤超荧光光源。图 5 为其输出光谱,其中实测光源输出功率为 46.9 mW,平均波长 1550.5 nm,而且该光源能保持较宽的带宽,积分带宽为 34.54 nm,尤其是光光转换效率可达 42.6%,剔除实验装置中各种元器件对 1550 nm 光的损耗,这一转换效率几乎接近量子转换理论极限。

## 5 结 论

对由 Corning 公司的商用掺铒光纤 Er1550C3 构成的双程后向结构掺铒光纤超荧光光源进行了理论和实验研究。应用自主研发的光纤光源模拟软件,首先仿真了光源输出功率和带宽随掺铒光纤长度的变化趋势,并进行了对等实验验证,表明理论模拟和实验趋势一致。折衷考虑光源功率和带宽指标,初步确定掺铒光纤长度的优化范围;模拟了反射镜反射率对光源输出光谱和稳定性的影响并计算出最佳反射率为 0.0032;实验研究了不同光纤长度下抽运功率对光源平均波长的影响,获得优化抽运功率范围为 70~110 mW。在理论和实验研究基础上,取优化抽运功率 110 mW,优化掺铒光纤长度 13.74 m,实验获得了输出功率为 46.9 mW 的高功率光纤光源,其抽运转换效率可达 42.6%,而且光源保持了约 34.54 nm 的宽带宽,是光纤传感器用光源的理想选择。该光纤光源也可用于其他要求高功率、宽带宽光源的应用场合。

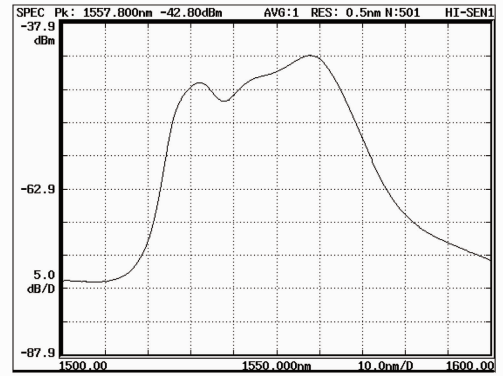


图 5 高功率高效率光纤光源输出光谱  
Fig. 5 Spectrum of high-power, high-efficiency fiber source

## 参 考 文 献

- 1 S. C. Tsai, T. C. Tsai, P. C. Law. High pumping-efficiency L-band erbium-doped fiber ASE source using double-pass bidirectional-pumping configuration[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(2): 197~199
- 2 Yang Jiuru, Ye Hong'an, Liu Chunyu. Stabilize the output power of superfluorescent source by using hybrid controller[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(6): 1520~1524  
杨九如, 叶红安, 柳春郁. 采用混合控制器稳定超荧光光源的输出功率[J]. *中国激光*, 2010, **37**(6): 1520~1524
- 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 Jiao Lei, Song Yuejiang, Zhang Xuping. Four-wave-mixing enhanced multi-wavelength Brillouin erbium-doped fiber laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(2): 0214007  
焦磊, 宋跃江, 张旭苹. 四波混频增强多波长布里渊掺铒光纤激光器的实验研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(2): 0214007
- 5 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
- 6 Liu Yinggang, Qiao Xueguang, Jia Zhen'an *et al.*. Optimization and study on a high-performance ASE fiber source[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2011, **22**(10): 1475~1478  
刘颖刚, 乔学光, 贾振安 等. 一种高性能光纤 ASE 光源的优化与研究[J]. *光电子·激光*, 2011, **22**(10): 1475~1478
- 7 Guo Xiaodong, Qiao Xueguang, Jia Zhen'an *et al.*. High-power broadband light source for fiber Bragg grating sensors[J]. *J. Transducer Technology*, 2005, **24**(1): 75~77  
郭小东, 乔学光, 贾振安 等. 光纤光栅传感器用的高功率宽带光源[J]. *传感器技术*, 2005, **24**(1): 75~77
- 8 Hung Wencai, Wang Xiulin, Ming Hai. High power broad bandwidth erbium-doped superfluorescent fiber source[J]. *Chinese J. Quantum Electronics*, 2005, **22**(1): 95~97  
黄文财, 王秀琳, 明海. 高功率宽带掺铒光纤超荧光光源研究[J]. *量子电子学报*, 2005, **22**(1): 95~97
- 9 Chen Shengping, Lü Kecheng, Li Yigang *et al.*. High power, high efficiency Erbium-doped superfluorescent fiber source

- and its applications[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(1): 17~20
- 陈胜平, 吕可诚, 李乙钢 等. 大功率高效率掺铒超荧光光纤光源及其应用[J]. 光子学报, 2004, **33**(1): 17~20
- 10 Dominique M. Dagenais. Wavelength stability characteristics of a high-power, amplified superfluorescent source[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(8): 1415~1422
- 11 Yang Yuanhong, Wang Zheng, Yi Xiaosu *et al.*. High precision fiber optic gyroscope based on Er-doped superfluorescent fiber source[J]. *J. Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2005, **31**(11): 1159~1162
- 杨远洪, 王 峥, 伊小素 等. 基于掺铒超荧光光纤光源的高精度光纤陀螺[J]. 北京航空航天大学学报, 2005, **31**(11): 1159~1162
- 12 Zhang Li, Liu Chengxiang, Ye Weiwei. Numerical simulation and software implementation of erbium-doped fiber source [J]. *J. Shenzhen University Science and Engineering*, 2010, **27**(3): 322~326
- 张 力, 刘承香, 叶薇薇. 掺铒光纤光源的数值模拟及软件实现[J]. 深圳大学学报理工版, 2010, **27**(3): 322~326
- 13 D. C. Hall, W. K. Burns, R. P. Moeller *et al.*. High-stability Er<sup>3+</sup>-doped superfluorescent fiber sources[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(7): 1452~1460
- 14 Shen Linfang. High Stability Erbium-Doped Superfluorescent Fiber Source [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2000. 37~38
- 沈林放. 高稳定掺铒光纤超荧光宽带光源[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2000. 37~38
- 15 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