

文章编号: 1001-3806(2004)02-0221-04

# 双程后向结构掺铒光纤超荧光光源研究

邢丽峰, 肖 瑞, 冯 莹

(国防科学技术大学 理学院 光电工程系, 长沙 410073)

**摘要:** 通过编制 1 套图形界面的模拟分析软件, 对双程后向结构掺铒光纤超荧光光源有关输出功率、带宽和平均波长特性进行了理论模拟。结果表明, 通过选取适当的掺铒光纤长度, 总能实现光源的平均波长不依赖于泵浦功率的高稳定性。并报道了研制的双程后向结构掺铒光纤超荧光光源。

**关键词:** 宽带光源; 超荧光光纤光源; 光纤陀螺; 掺铒光纤

中图分类号: TN253 文献标识码: A

## Analysis of erbium-doped superfluorescent fiber source in double pass backward configuration

XING Liefeng, XIAO Rui, FENG Ying

(Department of Optoelectronic Engineering, College of Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Erbium doped superfluorescent fiber sources(SFS) in double pass backward(DPB) configuration are characterized in output power, spectrum linewidth and mean wavelength through theoretical simulation. The results indicate that DPB SFSs mean wavelength can be adjusted insensitive to pump power by properly adjusting the erbium doped fiber(EDF) length, SFS with double pass backward configuration made by us is also reported.

**Key words:** broadband light source; superfluorescent fiber source(SFS); fiber optic gyroscope(FOG); erbium doped fiber(EDF)

### 引 言

高精度光纤陀螺(fiber optic gyroscope, FOG)(尤其是航天惯性导航级)对所用光源有很高的要求,即光源不仅要有较大的输出功率,还必须具有宽频带、平均波长高稳定性的特性。高功率光源(约 10mW)可提高光纤陀螺的测量灵敏度;宽带光源(约 10nm)可降低光纤陀螺由于瑞利后向散射、偏振交叉耦合、光克尔效应等引起的相干噪声;波长稳定的光源可提高光纤陀螺比例因子的稳定性(约  $10^{-6}$ )。激光二极管泵浦的掺铒光纤超荧光光源(super fluorescent fiber source, SFS),自 1989 年提出以来,人们对它进行了广泛的理论和实验研究,已成为高精度光纤陀螺最有潜力的候选光源<sup>[1-4]</sup>。人们在理论和实验研究中最早发现,对于单程后向(single pass backward, SPB)结构光源,通过选取适当的掺铒光纤(erbium

doped fiber, EDF)长度,可使输出超荧光的平均波长具有在很宽范围内不依赖于泵浦功率的高稳定性<sup>[1,3]</sup>。而这种相对于泵浦功率的高稳定性,同样可在双程后向(double pass backward, DPB)结构 SFS 上得到实现<sup>[4]</sup>。DPB SFS 与 SPB SFS 相比,只在结构上增加了一个反射镜,却获得了更高的泵浦效率。下面将对 DPB SFS 的特性进行理论分析,拟为进一步的实验研究提供理论指导。

### 1 物理模型

双程后向超荧光光源结构如图 1 所示。假定超

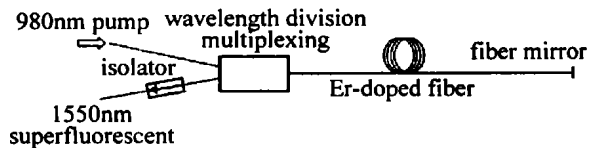


Fig.1 Schematic of SFS in double pass backward configuration

荧光在光纤截面上均匀分布;忽略铒离子对之间的相互作用,同时忽略泵浦高能级与激光上能级的受激吸收(excited state absorption, ESA);考虑泵浦光和信号光在光纤中都以 LP<sub>01</sub>模传播。用等效的三能级系统来描述其物理过程,把光源的频谱分成 N 个区域,则光源的性质可由 2N + 1 束光沿掺铒光纤的演

作者简介:邢丽峰(1978),男,硕士,目前主要从事掺铒光纤光源和光纤激光器的研究。

E-mail: xingpengjing@163.com

收稿日期:2003-05-27;收到修改稿日期:2003-10-22

化情况决定。用  $P_{s,i}^{\pm}(z)$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) 表示前向/后向传播的频率为  $\nu_i$  的超荧光在光纤内距泵浦光输入端  $z$  处的信号光功率;  $P_p(z)$  表示在光纤内距泵浦光输入端  $z$  处的泵浦光功率。则它们沿光纤的演化可用下面的方程组来描述<sup>[1]</sup>:

$$\frac{dP_{s,i}^+(z)}{dz} = r_{s,i}(z)P_{s,i}^+(z) + r_{e,s,i}(z)2h\nu_i \frac{\Delta\nu_i}{N} \quad (1)$$

$$\frac{dP_{s,i}^-(z)}{dz} = -r_{s,i}(z)P_{s,i}^-(z) + r_{e,s,i}(z)2h\nu_i \frac{\Delta\nu_i}{N} \quad (2)$$

$$\frac{dP_p(z)}{dz} = -r_p(z)P_p(z) \quad (3)$$

式中,  $r_{s,i}(z) = A_o[\sigma_{e,i}N_2(z) - \sigma_{a,i}N_1(z)]/A_s$ ,  $r_{e,s,i}(z) = A_o[\sigma_{e,i}N_2(z)]/A_s$ ,  $r_p(z) = A_o[\sigma_{p,a} \times N_1(z)]/A_p$ 。(1)式和(2)式右端第1项是受激辐射产生的超荧光,第2项是自发辐射产生的超荧光。其中,  $\nu_i$  为第  $i$  束超荧光频率;  $\sigma_{a,i}$  和  $\sigma_{e,i}$  为铒离子的吸收和发射截面,  $\sigma_{p,a}$  为泵浦光吸收截面;  $A_o$  为纤芯面积,  $A_s$  为超荧光模面积,  $A_p$  为泵浦光模面积;  $h$  为普朗克常数,  $\Delta\nu_i$  为频宽;  $N_1(z)$  和  $N_2(z)$  分别为单位体积内激光上、下能级上的铒离子浓度。

取  $N = 10$ , 这是1个由21个变量、21个常微分方程组成的微分方程组的边值问题。方程组的边界条件依赖于SFS的具体结构,对于双程后向结构情形边界条件为:  $P_{s,i}^+(0) = 0, P_{s,i}^-(L) = R_{s,i}P_{s,i}^-(L), P_p(0) = P$ 。式中,  $L$  为掺铒光纤长度,  $R_{s,i}$  为反射镜对频率为  $\nu_i$  的信号光的反射率。

### 2 数值分析

针对目前采用较多的单程后向、单程前向、双程后向、双程前向等几种典型的光源结构,编制了一套较通用的模拟分析软件<sup>[5]</sup>。该软件实现了以图形界面为主的人机交互工作方式。设计者只需输入光纤参数、泵浦功率等外部参数就可以对4种结构的光源进行理论模拟与分析。图2为该掺铒光纤光源模拟软件整体界面图。该模拟软件包括运算模块、界面模块和作图模块3个部分。其中,运算模块主要负责求解微分方程组的边值问题,它从界面模块接收参数的输入并把运算的结果交给界面模块和作图模块。界面模块负责与用户的交互,接收用户的参数输入,将运算结果输出给用户,并对各模块进行调用和协调。作图模块负责对运算结果进行处理并用曲线图的形式将处理结果和变化趋势进行显示。

文中对DPB SFS光源的模拟采用了天津46所



Fig.2 The interface of EDF SFS simulation software

提供的掺铒光纤的铒离子浓度,其余参数采用的是加拿大 Coractive 公司的 EDF L1500 光纤参数,见表1。

Table 1 Values of parameters used in the simulations

Er <sup>3+</sup> concentration	4.34 × 10 <sup>24</sup> mol/m <sup>3</sup>
fiber core area	5.68 μm <sup>2</sup>
signal mode area	22.21 μm <sup>2</sup>
pump mode area	7.64 μm <sup>2</sup>
fluorescence lifetime	10 ms
pump absorption cross section(980nm)	3.09 × 10 <sup>-25</sup> m <sup>2</sup>

作者模拟分析了这种掺铒光纤构成的DPB SFS的一些性质。图3中给出了在100mW泵浦功率下

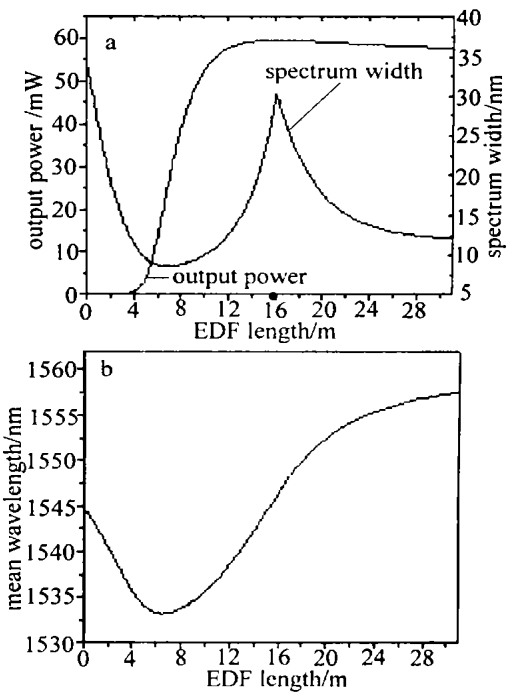


Fig.3 a—output power and spectrum width versus  $L$  for DPB SFS b—mean wavelength versus  $L$  for DPB SFS

DPB SFS 的输出信号功率、带宽和平均波长与光纤长度的关系,考虑反射镜近似全反情形,即  $R_{s,i} = 0.9$ 。可以看到,当光纤长度较短,即  $L < 16.1$  m 时,

泵浦光吸收不充分,光源的输出功率随着掺铒光纤长度的增长而增长,且增长率很大。由于泵浦光没有得到充分的利用,多余的泵浦光将向前输出。当光纤长度增长到 16.1m 时,泵浦光被充分吸收利用,超荧光光源的输出功率达到最大值。当光纤长度继续增长并超过 16.1m 时,输出功率开始随光纤长度的增加而逐渐减小,原因是这时光纤输出端的泵浦光很弱,不足以产生足够高的增益来补偿光纤本身的吸收损耗。

在  $L \approx 16.1\text{m}$  时,光谱带宽出现了最大值,为 30.2nm。这是因为随着光纤长度的增长,光源输出信号频谱的长波长成分得到提高,当  $L = 16.1\text{m}$  时,输出谱形是短波长峰与长波长峰接近双峰平衡的情形。若  $L$  (大于 16.1m) 继续增大,则光源输出频谱的长波长峰将高于短波长峰,带宽随之下降。

平均波长与光纤长度的关系可以由光纤在不同的荧光谱下发射截面和吸收截面的变化来解释。从表 2 中可以看出,掺铒光纤的发射截面和吸收截面在 1529nm 处最大。当光纤长度比较短 ( $L < 6.2\text{m}$ ),光纤处于强增益状态,各个频率的光都得到增益,

Table 2 Emission cross sections and absorption cross sections

ASE cross sections	$\sigma_{e,i} / 10^{-25}\text{m}^2$	$\sigma_{a,i} / 10^{-28}\text{m}^2$
1525nm	7.67	9.49
1529nm	9.14	10.40
1535nm	7.97	7.99
1542nm	7.06	6.12
1546nm	6.84	5.47
1550nm	6.62	4.87
1554nm	6.45	4.38
1558nm	6.31	3.95
1562nm	5.74	3.31
1566nm	4.94	2.65

因而功率相差不大。另一方面,短波长光的发射截面较长,波长的发射截面大,所以,短波长光的发射占主导,平均波长偏向短波长方向。当光纤长度增加到 6.2m 时,光纤得以充分泵浦,1529nm 光的大发射截面的优势得以发挥。因此,1529nm 光的功率最大,平均波长达到最小,最接近 1529nm。当光纤的长度继续增长时,光纤处于非完全泵浦状态中。注意到表 2 中短波长光的吸收截面比发射截面大,而长波长光的发射截面比吸收截面大。所以,随着光纤长度的增加,泵浦光的相对减弱,短波长光受激吸收所占的比重越来越大,而长波长光受激发射的比

重开始加大,平均波长向长波方向移动。

图 4 中给出了在不同 EDF 长度下光源的平均波长随泵浦功率的变化关系。从图中可以看出,对

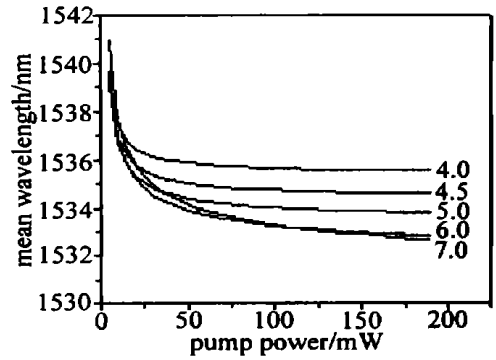


Fig. 4 Mean wavelength versus pump power for DPB SFS with different EDF lengths labeled

应不同长度的光纤总存在一个泵浦功率范围,平均波长对这个范围内的泵浦功率变化不敏感,而且随着光纤长度的增加,这个泵浦功率范围逐渐向高泵浦功率方向移动。在激光二极管可发射的泵浦功率 40mW~85mW 范围内,光纤长度在 4m~5m 时都有  $\frac{1}{\lambda} \frac{d\lambda}{dP_p} \approx 10^{-6}/\text{mW}$ 。当光纤长度增加时,要想平均波长稳定在  $10^{-6}/\text{mW}$  量级,泵浦功率就需要达到很大。例如,当光纤长度为 4.5m,泵浦功率为 65mW 时,DPB SFS 可以工作在  $\partial N \partial P_p \approx 0$ 。所以,通过适当选取 EDF 长度,总能实现 DPB SFS 的输出超荧光的平均波长具有在很宽范围内不依赖于泵浦功率的高稳定性。

### 3 实验研究

对 DPB SFS 也做了实验研究。实验中利用中心波长 980nm 尾纤耦合输出的半导体激光器泵浦掺铒光纤,掺铒光纤由天津 46 所提供,长度为 20m。实验测得的超荧光输出光谱如图 5a 所示。泵浦功率为 85mW,输出功率 10.62mW,谱宽(FWHM) 27.8nm。从图 5b 中可以看到,从波长 1543nm 到 1558nm 近似 15nm 范围内,形成了  $\pm 0.2\text{dB}$  的平坦谱线。如此宽的平坦增益光谱可以满足各种对大功率光纤宽带光源的需求。但谱线在 1532nm 波长处存在一个峰值,该峰值严重影响了谱的 3dB 带宽和对称性,并使中心波长偏离 1550nm 处,这对于高精度光纤陀螺的应用是不利的。拟采取的措施是用一个长周期光纤光栅<sup>[6]</sup>或金属镀膜反射器对超荧光光源的光谱进行光学滤波,以去掉该峰值。而长周期光纤光栅属于透射型的滤波器件,背向散射小,插入损耗低,不会导致输出功率大幅下降,因而成为首选器件。改进工

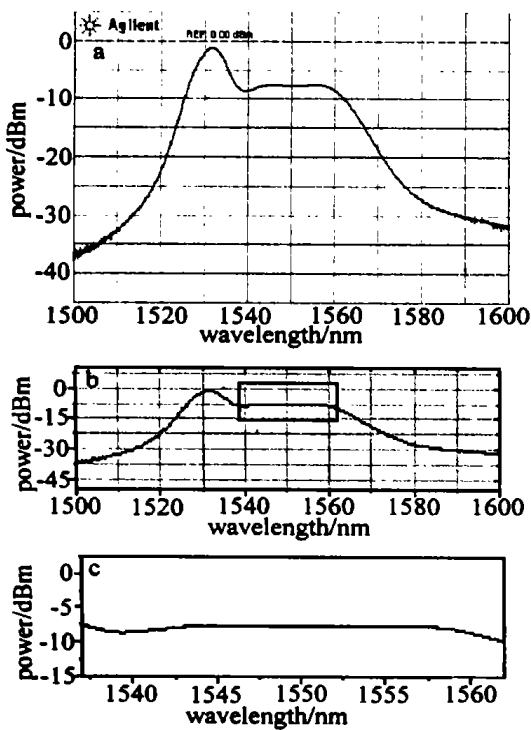


Fig. 5 a—output spectrum of DPB SFS at  $P_p = 85\text{mW}$ ,  $L = 20\text{m}$  b—zoom in on the output spectrum c—zoom in on the output spectrum

(上接第 198 页)

### 3 结论

提出了两种在三维传感测量系统中降低散斑噪声,提高深度分辨率的方法。第 1 种方法采用宏观上相同、微观上受物体微结构面元影响的多帧散斑图像叠加,通过特殊设计的校准模块的测量,完成三维测量系统的标定。第 2 种方法利用动态采集方式,使 CCD 对微结构元进行时间积分,从而降低散斑噪声的影响。实验证明,综合利用这两种方式,深度分辨率可以得到有效的提高。

#### 参考文献

- [1] TAKASAKI H. Appl Opt, 1970, 9: 1467.
- [2] TAKEDA M, MUTOH K. Appl Opt, 1983, 22(24): 397.

作正在进行中,有关实验结果将另文发表。

### 4 总结

在对双程后向结构超荧光光源数值模拟的基础上,给出了光源的输出功率、带宽和平均波长特性的理论分析。结果表明,通过选取适当的掺铒光纤长度,该结构光源总能实现平均波长不依赖于泵浦功率的高稳定性运行。最后给出了研制的双程后向掺铒超荧光光源的实验研究结果,证明该光源已经可以满足各种对大功率光纤宽带光源的需求。

#### 参考文献

- [1] WYSOCKI P F, DIGONNET M J F, KIM B Y *et al.* J Lightwave Technol, 1994, 12(3): 550~ 567.
- [2] WYSOCKI P F, DIGONNET M J F, KIM B Y. IEEE Photon Technol Lett, 1990, 2(3): 178~ 180.
- [3] HALL D C, BURNS W K, MOELLER R P. J Lightwave Technol, 1995, 13: 1452~ 1460.
- [4] WANG L A, CHEN C D. Electron Lett, 1996, 32(19): 1815~ 1817.
- [5] 肖 瑞. 掺铒光纤光源研究. 长沙: 国防科技大学, 2002. 11~ 18.
- [6] VENGSARKAR A M, PEDRAZZANI J R, JUDKINS J B *et al.* Opt Lett, 1996, 21(5): 336~ 338.

- [3] 陈文静, 苏显渝, 谭松新. 光学学报, 2000, 20(10): 1429~ 1434.
- [4] SRINIVASAN V, LUIH C, HALIOUA M. Appl Opt, 1984, 23(18): 305.
- [5] 李万松, 苏礼坤, 苏显渝. 光学学报, 2000, 20(6): 792~ 796.
- [6] SU L K, SU X Y, LI W S *et al.* Appl Opt, 1999, 38(7): 1153~ 1158.
- [7] LEWANDOWSKI J, DESJARDINS L. Opt Engng, 1995, 34(8): 2481~ 2486.
- [8] CHENG X X, SU X Y, GUO L R. Appl Opt, 1991, 30(10): 1274.
- [9] 吴剑波, 桑 波, 赵 宏 *et al.* 西安交通大学学报, 2001, 35(9): 949~ 953.
- [10] 罗晓晖, 居 琰, 王 希 *et al.* 激光技术, 2001, 25(4): 308~ 311.
- [11] 郝建华, 赵建林. 光学技术, 1998(2): 37~ 39.
- [12] LI J L, SU X Y, ZHOU W Sh. Opt Rev, 1995, 2(2): 144.
- [13] 李万松, 苏显渝, 李继陶. 中国激光, 1996, A23(12): 1081~ 1086.
- [14] 贾 波, 苏显渝, 郭履容. 中国激光, 1992, 19(4): 271~ 275.