

文章编号: 0258-7025(2001)12-1075-04

前向抽运双级双程掺铒光纤宽带光源

钱景仁 陈登鹏 沈林放 俞本立

(中国科学技术大学电子工程与信息科学系 合肥 230027)

提要 提出并实现了一种前向抽运双级双程结构的 $1.55 \mu\text{m}$ 超荧光光纤光源(SFS)。通过恰当地选择光源的各个参数,包括两段掺铒光纤(EDF)的长度和两级抽运光的功率,在保证平均波长稳定的情况下,获得了同时具有大功率和宽带特性的超荧光输出。这种结构的光源可以很好地满足高精度光纤陀螺(FOG)对光源的要求。

关键词 宽带光源 掺铒光纤 超荧光光纤光源 光纤陀螺

中图分类号 TQ 342 ;V 241.5⁺58 文献标识码 A

Forward-pumping Dual-stage Double-pass Broadband Erbium-doped Fiber Source

QIAN Jing-ren CHEN Deng-peng SHEN Lin-fang YU Ben-li

(Department of Electronic Engineering and Information Science,
University of Science and Technology of China, Hefei 230027)

Abstract A forward-pumping dual-stage double-pass erbium-doped fiber source at $1.55 \mu\text{m}$ is presented and experimentally demonstrated. Broadband, high-power characteristics can be obtained simultaneously while reserving the high stability of the mean wavelength by appropriately choosing the source parameters, including the length of two sections of erbium-doped fiber and the pump power of two stages. Such a fiber source is an excellent candidate for the fiber-optic gyroscope(FOG).

Key words broadband light sources, erbium-doped fiber(EDF), superfluorescent fiber source(SFS), fiber-optic gyroscope(FOG)

1 引 言

掺铒光纤超荧光光纤光源(EDSFS)在光纤陀螺、EDFA 测量、光纤传感、光谱测试以及低成本接入网等很多领域得到了广泛的应用。尤其是在高精度光纤陀螺中,这种光源是最具潜力的候选者。光纤陀螺对光源的要求主要表现在三个参数上:带宽、平均波长稳定性以及输出功率。宽带的光源($\sim 10 \text{ nm}$)可以降低由于瑞利后向散射、偏振交叉耦合、克尔效应等引起的相干噪声;波长稳定的光源可以提高光纤陀螺比例因子的稳定性($\sim 10^{-6}$);高功率光源($\sim 10 \text{ mW}$)可以提高光纤陀螺的测量灵敏度。传统采用的发光二极管(LED)和超发光二极管(SLD)的波长稳定性较差,功率较小,寿命较短,无法满足高性能光纤陀螺对光源的要求^[1]。而掺铒光纤超

荧光光源输出的放大自发辐射光(ASE)则同时具有光谱宽、输出功率高、稳定性好等优点,因而在高性能光纤陀螺中得到了应用^[2]。

多种结构的掺铒光纤超荧光光源已被提出和研究^[3-7]。在这些结构中,单程后向结构由于实现简单并且不容易形成激光而被广泛采用^[4],但是这种结构光源的输出带宽相对较窄;双程结构的光源可以得到更高的输出功率和更好的波长稳定性^[5,6],但是为了得到宽带输出需要设计复杂的滤波器;单程前向结构的光源在带宽较宽时输出功率很小,因而一般不被采用。最近提出的一种双级后向输出的光源^[7]同时具有很高的输出功率和较宽的光谱带宽,但由于体积和成本因素不易在光纤陀螺中推广应用。

本文提出一种前向抽运双级双程结构的掺铒光纤超荧光光源,其优点在于在较小的抽运功率下,可以在保持高稳定性的情况下同时获得大功率、宽光

谱的 ASE 输出。由于两级抽运光是通过将带尾纤的半导体激光器的输出光进行功率分配得到的,因而结构紧凑,成本较低,适于在光纤陀螺中使用。

2 超荧光光纤光源的基本理论

在光纤陀螺中,转动速度的测量精度由比例因子的稳定性来决定。比例因子将 Sagnac 相移 $\Delta\Phi$ 和转动速度 Ω 以下式联系起来

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi LD}{\lambda c} \Omega \quad (1)$$

其中, D, L 为光纤陀螺中光纤线圈的直径和长度, c 为光速, $\bar{\lambda}$ 为光源的平均波长。根据光纤陀螺的响应特点,平均波长是通过以功率谱密度作为加权因子进行加权平均的方式来定义的

$$\bar{\lambda} = \frac{\int P(\lambda) \lambda d\lambda}{\int P(\lambda) d\lambda} \quad (2)$$

在光纤陀螺中,输出是用平方律探测器进行测量的。由于各种机制引起的误差都随着由功率平方加权的带宽的增加而减小,因此,这是计算光源带宽

理想的方法^[3]

$$\Delta\lambda = \frac{\left[\int P(\lambda) \lambda d\lambda \right]^2}{\int P^2(\lambda) d\lambda} \quad (3)$$

光源的平均波长对于温度变化的稳定性可以表示为

$$\frac{d\bar{\lambda}}{dT} = \frac{\partial \bar{\lambda}}{\partial T} + \frac{\partial \bar{\lambda}}{\partial \lambda_{\text{pump}}} \frac{\partial \lambda_{\text{pump}}}{\partial T} + \frac{\partial \bar{\lambda}}{\partial P_{\text{pump}}} \frac{\partial P_{\text{pump}}}{\partial T} \quad (4)$$

式中,第一项为掺铒光纤对于温度的本征变化率,与选择的光纤有关,第二项是由抽运波长变化引起的,由于目前采用的 980 nm 抽运激光器一般都采用了光纤光栅波长稳定技术,因此这一项的效应可以忽略,第三项是由抽运功率变化引起的,抽运功率随温度的变化一般为 $-0.3 \text{ mW}/^\circ\text{C}$ 。测量抽运功率的改变引起的光源平均波长的变化可以衡量不同结构光源的波长稳定特性。

3 前向抽运双级双程 EDSFS 的结构和工作原理

前向抽运双级双程结构的掺铒光纤超荧光光源的结构如图 1 所示。

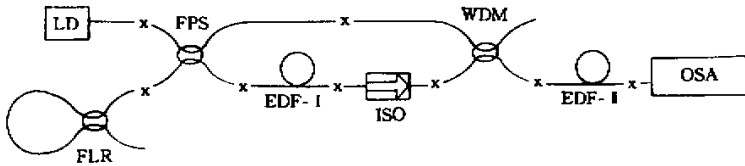


图 1 前向抽运双级双程掺铒光纤超荧光光源实验装置

LD 980 nm 抽运激光器;FLR 光纤圈反射器;EDF 掺铒光纤;
ISO 隔离器;FPS 光纤功率分配器;WDM 980 nm/1550 nm 波分复用器;OSA 光谱分析仪

Fig. 1 Experimental setup of the forward-pumping dual-stage double-pass EDSFS

LD : 980 nm pump laser ; FLR : fiber loop reflector ; EDF : erbium-doped fiber ; ISO : isolator ;

FPS : fiber power splitter ; WDM : 980 nm/1550 nm wavelength division multiplexer ; OSA : optical spectrum analyzer

实验中采用的两段掺铒光纤在 980 nm 附近的小信号吸收率大约为 $2 \text{ dB}/\text{m}$ 。抽运激光器的工作波长为 978 nm;光纤圈反射器在 1520~1570 nm 内反射率大于 95%,并且与偏振状态无关;光纤功率分配器使得 1550 nm 附近的光几乎全部通过其直通臂,以保证反射器的有效作用;980 nm/1550 nm 波分复用(WDM)的隔离度大于 20 dB;隔离器的隔离度大于 30 dB;用来测量光谱输出的光谱分析仪的分辨率为 0.1 nm。平均波长和带宽分别由(3)(4)式计算得出。

双级结构的采用可以分别处理光谱的调整和功率的放大两个问题。第一级采用的是双程前向 EDSFS。当前向 EDSFS 的抽运功率一定时,随着光纤长度的增加,在输出 ASE 的光谱中,长波长范围内的光开始占据主导地位。这是由于当光纤较长时,短波长范围内的 ASE 光被铒离子重新吸收,成为二次抽运源。再次发射的 ASE 的光主要集中在长波长范围内。这种现象可以从在不同抽运功率下光源的前向输出光谱间接地看出。

图 2(a)(b)分别是掺铒光纤长度为 18 m 和

9 m 时不同抽运功率下单程前向结构光源的输出光谱。选择第一级掺铒光纤的长度和抽运功率, 就可以使得其 ASE 输出既有足够的强度, 又使其光谱中的能量集中在长波长区域。光纤圈反射器的作用是

将第一级后向的 ASE 输出反射使其重新进入掺铒光纤进行放大以增加前向输出的功率, 从而保证整个光源具有更高的效率。

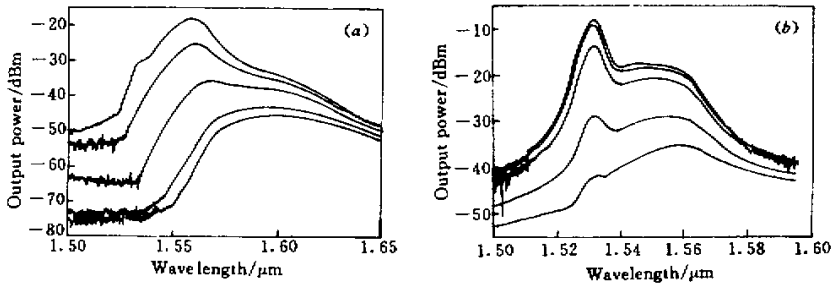


图 2 单程前向输出光谱, 自下而上抽运功率分别为 12, 15, 27, 42, 56 mW

(a) 掺铒光纤长度为 18 m; (b) 掺铒光纤长度为 9 m

Fig. 2 Output spectra of single pass forward pumping EDSFS, the curves correspond to the pump power of 12, 15, 27, 42, 56 mW from below to above the length of EDF is 18 m (a) and 9 m (b)

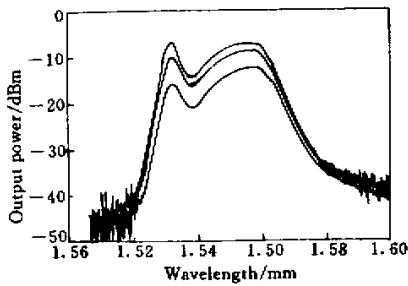


图 3 双级双程前向输出光源的输出光谱, 自下而上抽运功率分别为 40, 60, 80 mW

Fig. 3 Output spectra of forward-pumping dual-pass EDSFS, the curves correspond to the pump power of 40, 60, 80 mW from below to above

在第一级和第二级之间加入光隔离器不仅可以避免由于输出端反馈引起激光的产生, 而且可以使第一级的 ASE 输出的光谱不受第二级的影响。第二级在放大第一级输出光的同时产生短波长范围的 ASE (类似于单程前向输出结构的 SFS)。调整第二级的抽运功率和掺铒光纤的长度, 使得长波长和短波长两部分光的幅度相当时, 即可获得大功率的宽带光源。

4 实验结果和结论

经过对两级光纤的长度和抽运功率进行优化, 选定光纤功率分配器直通臂和耦合臂的分光比 (对应于第二级和第一级的抽运功率之比) 在 980 nm 附近为 70:30。两段掺铒光纤的长度分别为 7.5 m

和 9 m。在总的抽运功率分别为 40, 60, 80 mW 时最终的输出光谱如图 3 所示。相应的平均波长与输出功率随抽运功率的变化规律及其与典型的单程后向结构光源的比较如图 4(a)(b) 所示。二者的带宽与输出功率关系的比较如图 4(c) 所示。

图 4(a) 显示两种结构的光源的平均波长随抽运功率变化的斜率相当, 表明两种光源的波长稳定度基本相同, 而图 4(b)(c) 显示在高功率输出时, 前向抽运双级双程结构的光源比单程后向光源具有更高的效率和更宽的带宽。新结构光源在总的抽运功率为 80 mW 的情况下 (考虑到焊接损耗等因素, 实际进入光纤的抽运功率大约为 60 mW), 光源输出光的平均波长对于抽运功率的稳定性为 $-59.3 \times 10^{-6}/\text{mW}$, 输出功率为 8 mW, 积分带宽为 31.5

nm,可以很好地满足光纤陀螺对光源的要求。

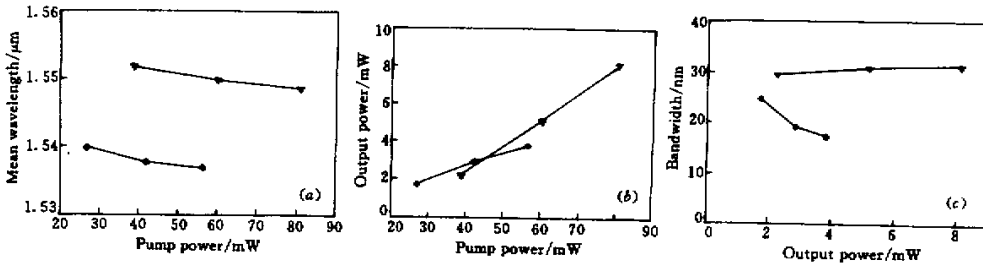


图4 ASE的平均波长(a)输出功率(b)带宽(c)与抽运功率的关系

◆为单程后向,▼为双级双程前向

Fig.4 Relationship between mean wavelength(a), power(b), bandwidth(c) of ASE and pump power

◆ corresponds to single-pass backward pumping; ▼ corresponds to current configuration

参 考 文 献

- 1 W. K. Burns Ed. . Optical Fiber Rotation Sensing. San Diego : Academic Press , 1994
- 2 G. A. Sanders , B. Szafraniec , L. K. Strandjord *et al.* . Progress in high performance fiber optic gyroscopes. Proceedings of the 1998 Annual AAS Rocky Mountain Guidance and Control Conference , San Diego : American Astronautical Society Publications Office , 1998. 197~202
- 3 Paul F. Wysocki , M. J. F. Digonnet , B. Y. Kim *et al.* . Characteristics of erbium-doped superfluorescent fiber sources for interferometric sensor applications. *J. Lightwave Technol.* , 1994 , **12** (3) : 550~567
- 4 Douglas C. Hall , William K. Burns , Robert P. Moeller. High-stability Er^{3+} -doped superfluorescent fiber sources. *J. Lightwave Technol.* , 1995 , **13** (7) : 1452~1460
- 5 L. A. Wang , C. D. Chen. Stable and broadband Er-doped superfluorescent fiber sources using double-pass backward configuration. *Electron. Lett.* , 1996 , **32** (19) : 1815 ~ 1817
- 6 L. A. Wang , C. D. Chen. Characteristics comparison of Er-doped double-pass superfluorescent fiber sources pumped near 980 nm. *IEEE Photon. Technol. Lett.* , 1997 , **9** (4) : 446~448
- 7 Dominique M. Dagenais , Lew Goldberg , Robert P. Moeller *et al.* . Wavelength stability characteristics of a high-power , amplified superfluorescent source. *J. Lightwave Technol.* , 1999 , **17** (8) : 1415~1421