

# 掺铒光纤超荧光宽带光源的实验研究

钱景仁 程旭 朱冰

(中国科学技术大学电子工程与信息科学系光纤实验室 合肥 230027)

**提要** 全部采用国产元器件成功地研制出了掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤超荧光宽带光源, 并对其功率特性、谱宽特性及其随温度的变化特性等作了初步实验分析, 并取得了较为理想的实验结果。针对宽带光源自然荧光谱有尖峰结构造成频谱过窄的问题, 提出了一种简单有效的改进方案, 从而颇有成效地抑制了尖峰, 扩展了频谱, 得到了较为满意的频谱宽度。

**关键词** 掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤, 宽带光源, 超荧光

众多的光纤传感器需用相干度低的光源, 超荧光具有相干度低的特点, 因而在光纤陀螺仪<sup>[1]</sup>、信号处理<sup>[2]</sup>等系统中获得广泛的应用。掺  $\text{Er}^{3+}$  或  $\text{Nd}^{3+}$  光纤的放大自发辐射(ASE)具有很好的温度稳定性, 其荧光谱宽可达数十个纳米, 是一种很有前途的、可用于惯性导航级别光纤陀螺的低相干性、单横模宽带光源, 称之为宽带超荧光光纤光源(SFS)<sup>[3,4]</sup>。由于谱很宽, 它可以减少系统的相干噪声、光纤瑞利散射引起的位相噪声以及光克尔效应引起的位相漂移。与超辐射发光二极管相比, 稀土掺杂光纤的 ASE 光源具有输出光谱稳定、受环境影响小、易于单模光纤传感系统耦合等优点。

高精度惯性导航级别的陀螺要求光源的平均波长稳定度达到  $10^{-6}$ , 谱宽大于 5 nm。目前国外对宽带光源研究测试表明对  $\text{Er}^{3+}$  光纤宽带光源在 1 h 内的稳定度已达  $0.9 \times 10^{-6}$  RMS (均方根值), 20 h 也小于  $8 \times 10^{-6}$ , 温度漂移为  $3 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ , 谱宽达到 24 nm, 最大输出功率可达 20 mW<sup>[5]</sup>。

采用新型光源的全光纤陀螺的特性也有了許多实验报道<sup>[6]</sup>, 其中在开环光纤陀螺中, 陀螺比例因子的长期稳定度已获得很大提高, 在测试的 17.5 h 内低于  $15 \times 10^{-6}$  RMS<sup>[7]</sup>。

本文报道在实验室条件下全部采用国产元器件成功地研制出了掺铒光纤超荧光宽带光源, 并针对光源荧光自然谱宽中存在尖峰结构导致谱宽较窄的问题采取了有力方案, 有效地扩展了频谱, 使其在 18 nm 以上, 从而取得了令人较为满意的结果。

## 1 实验与结果分析

Wysocki 等已研究过掺  $\text{Er}^{3+}$  宽带超荧光光纤光源不同的结构<sup>[8]</sup>, 大致可分为单程后向、单程前向、双程后向和双程前向等类型。在此, 由于后向泵浦单程 SFS 结构可避免光反馈引起的附加噪声, 即与其它 SFS 结构相比, 光反馈引起的稳定性问题对它影响最小, 完全可以忽略。

因而我们采用这种单程后向泵浦 SFS 形式。用  $1.5/0.98 \mu\text{m}$  波分复用器(WDM)代替二向色镜,以获得更高的耦合效率,如图 1 所示。这种方案具有结构简单、操作方便、性能稳定可靠等优点,且因为采用反向输出,避免了超荧光与剩余  $980 \text{ nm}$  泵浦光的混合输出。

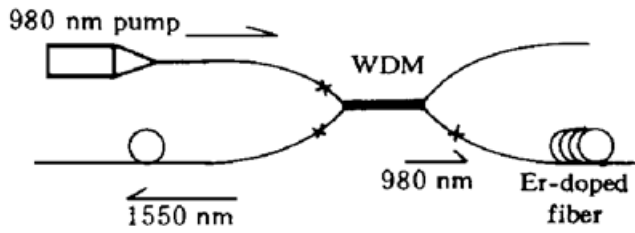


图 1 后向泵浦掺铒光纤超荧光宽带光源示意图

Fig. 1 Backward-pumped SFS structure

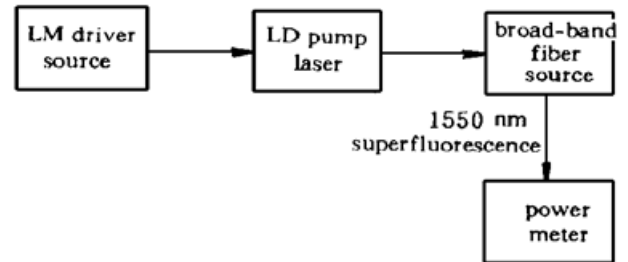


图 2 掺铒光纤超荧光宽带光源实验框图

Fig. 2 Experimental setup of the Er-doped SFS

根据上面的方案我们研制出后向泵浦宽带光源,研制中采用的元器件均为国产。掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤由天津市电子部 46 所提供,截止波长为  $1.0384 \mu\text{m}$ ,芯径为  $3.6 \mu\text{m}$ ,总长为  $21 \text{ m}$ 。 $980 \text{ nm}$ -LD 组件是中国科学院半导体所生产的,中心波长为  $972 \text{ nm}$ ,最大输出功率为  $35 \text{ mW}$ ;熔锥型 WDM 由我们自己研制;所使用的驱动电源是武汉电信器件公司所生产的 LM 驱动电源带 APC 型仪表。荧光测量系统由 ML93B 型光功率计和频谱分析仪组成。整个系统框图如图 2 所示。

由于有源和无源光纤的接头有损耗,在泵浦电流为  $100 \text{ mA}$  条件下,实际进入有源光纤的功率为  $13.9 \text{ mW}$ ,吸收的泵浦功率为  $6.9 \text{ mW}$ ,反向  $1.54 \mu\text{m}$  超荧光输出约为  $1.114 \text{ mW}$ 。考虑到接头损耗影响,实际荧光转换效率是  $30\%$ 。图 3 为单程超荧光输出功率-输入泵浦电流关系图。

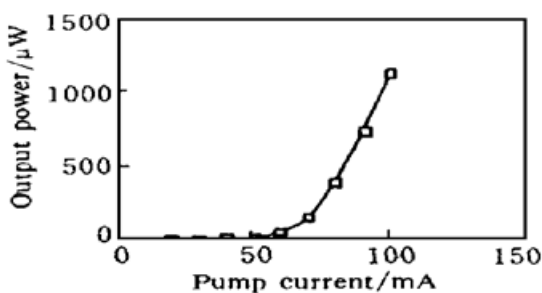


图 3 掺铒光纤超荧光宽带光源的输出功率-输入泵浦电流关系图

Fig. 3 Output power from the Er-doped SFS as a function of pump current (before improvement)

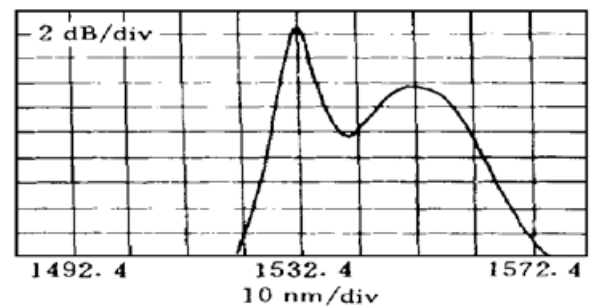


图 4 掺铒光纤超荧光宽带光源输出光谱(改进前)

Fig. 4 Optical spectrum profile of the Er-doped SFS at a pump current of  $90 \text{ mA}$

测试结果表明光源输出的光功率达到  $1 \text{ mW}$ 。但荧光谱宽较窄,只有  $5 \text{ nm}$  左右( $3 \text{ dB}$  带宽),这主要因为光源输出的荧光自然谱有尖峰结构,从而造成谱宽度过窄。如图 4 所示。

在分析了造成谱宽过窄的原因后,我们采取了一种简单而有效的改进方案来扩展谱宽,即在原宽带光源输出端再接上一段长约  $0.8 \text{ m}$  的掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤,利用其吸收峰在  $1.53 \mu\text{m}$  附近来达到抑制自然荧光谱中的尖峰以达到增加带宽的目的。

改进后输出功率-输入泵浦电流特性如图 5 所示。

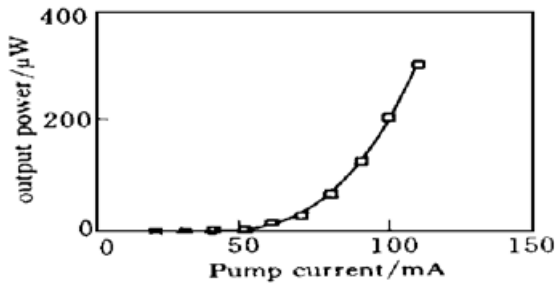


图 5 掺铒光纤超荧光宽带光源输出功率-输入泵浦电流特性图(改进后)

Fig. 5 Optical power from the Er-doped SFS as a function of pump current (after improvement)

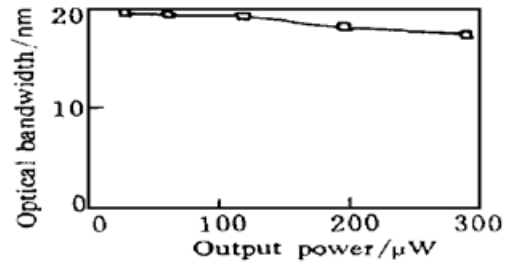


图 6 掺铒光纤超荧光宽带光源谱宽(3 dB)-输出功率特性图

Fig. 6 Optical bandwidth (3dB) of the Er-doped SFS as a function of output power

由图 5 可看出, 由于在输出端接上了一段长 0.8 m  $\text{Er}^{3+}$  光纤吸收了自然荧光谱尖峰的部分功率, 又增加了一个接头损耗, 这样实际输出的反向超荧光功率就有了明显下降, 但仍然可达 0.15 mW 以上。同时从谱宽-输出功率特性(图 6), 发现改进后荧光谱宽明显增加, FWHM 带宽在 30 nm 以上, 3 dB 带宽也达到 19 nm 以上。从而说明改进方案是有效的, 不仅成功地扩展了荧光谱宽, 同时也保证了荧光功率可以满足实际陀螺系统的要求。从图 6 还可看出谱宽的改变是一个逐渐变化的过程, 随着输出功率的增加而下降。图 7 为改进后宽带光源在泵浦电流为 90 mA 的谱宽曲线图, 与图 4 比较可见, 频谱都是双峰结构, 但改进前其中一峰较高而尖锐, 占大部分功率, 两峰峰值间差异较大, 导致 3 dB 带宽过窄; 改进后由于抑制了尖峰, 从而使两峰值接近, 频谱变宽。

荧光频谱的变化是影响宽带光源工作性能的一个重要因素。我们在泵浦情况相同的条件下, 对掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤的荧光发射谱随光纤温度的变化也进行了初步实验研究, 进而计算出平均波长变化率。具体参数测量如下: 泵浦电流为 100 mA, 实际进入有源光纤的泵浦功率为 13 mW。用水浴恒温装置, 从室温 24℃ 开始测试, 最大测试温度为 52℃。中间设置了几个测试点。根据实验数据, 其平均波长及其变化率的定义

$$\bar{\lambda} = \frac{\int \lambda P(\lambda) d\lambda}{\int P(\lambda) d\lambda} \tag{1}$$

$$\delta\lambda = \frac{\bar{\lambda}' - \bar{\lambda}}{\bar{\lambda}} \tag{2}$$

式中,  $P(\lambda)$  为波长  $\lambda$  处所对应的光功率,  $\bar{\lambda}$  与  $\bar{\lambda}'$  分别对应不同测试温度下宽带光源的平均发射波长。

可计算得到对应不同的温度, 其平均发射波长如下表所示。由此计算得平均波长的温度变化率约为  $10 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 。

$T$	32℃	42℃	52℃
$\bar{\lambda}$	1.5310 $\mu\text{m}$	1.5309 $\mu\text{m}$	1.5307 $\mu\text{m}$

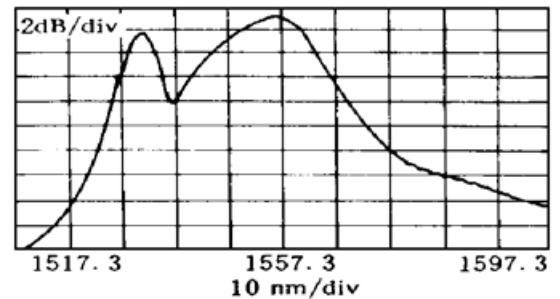


图 7 掺铒光纤超荧光宽带光源输出光谱(改进后)

Fig. 7 Optical spectrum profile of the Er-doped SFS at a pump current of 90 mA (after improvement)

## 2 结 论

一系列测试结果说明利用国产元器件所研制的掺铒光纤宽带光源是成功的。不仅获得了  $1.54 \mu\text{m}$  的超荧光, 而且在荧光自然谱宽较窄的情况下采取了简单而有力的方案成功扩展了频谱, 取得了较为满意的带宽, 同时也保证了输出功率在  $0.15 \text{ mW}$  以上, 能满足应用要求。尽管平均波长随温度变化率与国外有关资料<sup>[5,9]</sup>相比偏大, 这仅表明实验参量尚未能达到最佳状况。若泵浦源稳定性足够好, 环境影响足够小, 平均波长随温度变化率将进一步下降。

致谢 北京航空航天大学宇航学院控制与陀螺惯导研究室提供了很多帮助, 特此致谢。

### 参 考 文 献

- 1 R. A. Bergh, B. Culshaw, C. C. Cutler *et al.*. Source statistics and the Kerr effect in fiber-optic gyroscopes. *Opt. Lett.*, 1982, **7**(11): 563~ 565
- 2 B. Mosleshi, J. W. Goodman, M. Tur *et al.*. Fiber-optic lattice signal processing. *Proc. IEEE*, 1984, **72**(7): 909~ 930
- 3 K. Liu, M. Digonnet, H. J. Shaw *et al.*. 10 mW superfluorescent single-mode fibre source at 1060 nm. *Electron. Lett.*, 1987, **23**(24): 1320~ 1321
- 4 W. K. Burns. Fiber superfluorescent sources for fiber gyro applications. in Springer Proceedings in Physics, 1989, vol. 44. Berlin: Springer-Verlag, 143~ 148
- 5 D. C. Hall, W. K. Burns, R. P. Moeller. High-stability  $\text{Er}^{3+}$ -doped superfluorescent fiber sources. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(7): 1452~ 1460
- 6 K. Iwatsuki. Long-term bias stability of all-PANDA fiber gyroscope with  $\text{Er}^{3+}$ -doped superfluorescent fiber laser. *Electron. Lett.*, 1991, **27**(12): 1092~ 1093
- 7 W. K. Burns, R. P. Moeller, C. A. Villavuel. 1.06  $\mu\text{m}$  all-fiber optical gyroscope. *Proc. SPIE*, 1991, **1585**, Fiber Optical Gyros: 15th Anniversary Conf., 324~ 330
- 8 P. 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
- 9 B. Y. Kim. Broadband Fiber Sources for Gyroscopes. Proc. of 9th International Conference on Optical Fiber Sensors, 1991. 129~ 133

## The Experimental Research of a Broadband Erbium-doped Fiber Superfluorescence Source

Qian Jingren Cheng Xu Zhu Bing

(Optical Fiber Lab., Department of Electronic and Engineering, USTC, Hefei 230027)

**Abstract** With all utensils made in China we have successfully manufactured a broadband  $\text{Er}^{3+}$ -doped fiber superfluorescence source. The basic characteristics of the superfluorescence source, such as the output power, output linewidth, and the change of the linewidth with temperature, have been analyzed and studied. And rather good experimental results have been obtained. To address directly the question why the natural fluorescence spectrum of the broadband source has a pinnacle structure which results in a too narrow linewidth, we present a simple but effective measure to restrain the pinnacle. Consequently, a spreaded frequency spectrum with a satisfactory width has been obtained.

**Key words** erbium-doped fiber, broadband light source, superfluorescence