

## 泵浦功率对掺铒光纤光源性能影响的实验研究

闫晓琴,高峰,张桂才

(中国航天时代电子公司研究院 惯性技术研究部,北京 100854)

**摘要:**超荧光掺铒光纤光源技术是高精度光纤陀螺的关键技术之一,其优劣直接影响陀螺的性能。在完成铒纤长度优化设计的基础上,实验分析了泵浦功率对掺铒光纤光源平均波长以及带宽的影响,同时在 $-20\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内,测量了不同泵浦功率条件下掺铒光纤光源平均波长、带宽和输出功率随温度的漂移。实验结果表明,当泵浦功率在 $60\sim 120\text{ mW}$ 范围内时,平均波长受泵浦功率的影响约为 $-6.5\text{ ppm/mW}$ ,可以根据光纤陀螺对输出功率和带宽大小的要求在此范围内选择合适的泵浦功率。最终装配样机的平均波长的长期稳定性(6 h)达到 $5\text{ ppm}$ (峰-峰值),短期稳定性(1 h)达到 $2\text{ ppm}$ ,可以在此基础上定制合适的光纤光栅滤波器,对ASE光谱进行滤波,使谱形满足高精度光纤陀螺的要求。

**关键词:**双通后向超荧光掺铒光纤光源; 光纤陀螺; 泵浦功率; 平均波长

**中图分类号:**V241.5;O43 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-2276-(2005)04-0434-04

## Experimental study on the dependence of DPB SFS' performance on pump power

LV Xiao-qin, GAO Feng, ZHANG Gui-cai

(The Inertia Technology Academy of China Aerospace Times Electronics Corporation, Beijing 100854, China)

**Abstract:** Erbium-doped superfluorescent fiber source technology is one of the key technologies of the high-precision fiber-optic gyroscope (FOG). The performance of the source influences the FOG's scale factor and bias stability directly. Based on the optimum Erbium-doped fiber length has been fixed, the experimental investigation of the influence of pump power's fluctuation on DPB SFS's mean wavelength and linewidth were presented. Meanwhile the shifts of mean wavelength, linewidth and output power with temperature for several pump power were measured in this work by rapidly cycling the source temperature between  $-20\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ . The experimental results are as follows, when pump power in the range of  $60\sim 120\text{ mW}$ , the influence of pump power's fluctuation on DPB SFS's mean wavelength is  $-6.5\text{ ppm/mW}$ . Appropriate pump power can be selected in this range. Finally, the sample's mean wavelength stability reached  $5\text{ ppm}$ (peak-to-peak) in 6 h, it can reach  $2\text{ ppm}$  for short time (1 h). The proper fiber Bragg grating to tailor the ASE spectrum are designed so that the width and shape of the spectrum can satisfy the high-precision FOG's request.

**Key words:** Double-pass backward erbium-doped superfluorescent fiber source; Fiber-optic gyroscope; Pump power; Mean wavelength

收稿日期:2004-10-20; 修订日期:2005-04-17

作者简介:闫晓琴(1979-),女,江苏如皋人,工程师,硕士,主要从事光纤陀螺方面的研究工作。

## 0 引言

高精度光纤陀螺(FOG)对光源的要求是:输出功率大、光谱宽、波长稳定性好。这种光源减少了FOG光纤中有害的相干噪声的影响。相干噪声由偏振耦合和背向散射噪声引起,会大大降低光纤陀螺的旋转灵敏度<sup>[1]</sup>。宽谱光源还减小了两束反向传输光波之间因功率不同而导致克尔效应所产生的零漂<sup>[2]</sup>。1.55 μm 宽带超荧光掺铒光纤光源是高精度光纤陀螺的理想光源,是实现惯导级(优于0.01°/h, <10 ppm)和精密级(优于0.001°/h, <1 ppm)光纤陀螺的重要保障。根据实验结果,超荧光掺铒光纤光源达到高精度光纤陀螺所要求的输出功率和谱宽很容易实现,关键的指标是平均波长<sup>[3]</sup>稳定性,因为光纤陀螺的标度因数是用光源平均波长标定的,光纤光源平均波长的稳定性直接决定光纤陀螺的标度因数稳定性<sup>[4,5]</sup>。对掺铒超荧光光纤光源,平均波长涨落的主要原因是环境温度的变化,有三个主要来源,可以表示为<sup>[6,7]</sup>:

$$\frac{d\bar{\lambda}_s}{dT} = \frac{\partial \bar{\lambda}_s}{\partial T} + \left( \frac{\partial \bar{\lambda}_s}{\partial \lambda_{\text{pump}}} \right) \left( \frac{\partial \lambda_{\text{pump}}}{\partial T} \right) + \left( \frac{\partial \bar{\lambda}_s}{\partial P_{\text{pump}}} \right) \left( \frac{\partial P_{\text{pump}}}{\partial T} \right) \quad (1)$$

式中第一项是掺铒光纤温度特性引起的平均波长 $\bar{\lambda}_s$ 的固有变化,第二项和第三项分别表示平均波长随泵浦波长和泵浦功率的变化。通过正确设定超荧光掺铒光纤光源的参数值,上述几种因素的影响可以相互抵消,从而达到精密级和导航级光纤陀螺的要求,降低工程应用中的温控精度。

本文在完成铒纤长度优化设计的基础上<sup>[8,9]</sup>,实验分析了公式(1)中的第三项,即泵浦功率对掺铒光源平均波长和带宽的影响,同时在-20~60 °C的温度范围内,测量了不同泵浦功率条件下掺铒光纤光源平均波长、带宽和输出功率随温度的漂移,在此基础上选择合适的泵浦功率,并对实验样机进行了长期稳定性测试。

## 1 DPB SFS 结构

超荧光掺铒光纤光源有多种结构,输出功率和谱宽与所采用的光学结构和方案有直接的关系。为了实

现较高的泵浦效率和大的谱宽,我们选择双通后向(DPB)结构<sup>[10]</sup>,同时采用增益平坦滤波器对放大的自发辐射(ASE)谱进行滤波。图1是双通后向结构的典型框图,由泵浦激光二极管、两个波分复用器(980/1550 nm)、掺铒光纤、光学隔离器、反射镜和光纤光栅滤波器等组成。波分复用器将泵浦光注入掺铒光纤中,沿向前、向后两个方向产生 ASE 信号。向前的 ASE 经反射镜反射后再次通过掺铒光纤放大并与后向 ASE 叠加,因而形成更强的后向输出功率,经隔离器和光纤光栅滤波器输出。

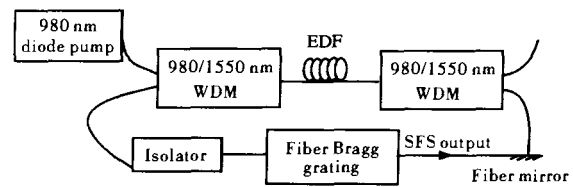


图1 双通后向掺铒超荧光光纤光源的结构

Fig.1 Diagram of DPB SFS configuration

## 2 实验结果和分析

实验采用如图1所示的光源结构,泵浦激光器的泵浦波长为974 nm,选择优化设计的铒纤长度20 m,利用光谱仪记录不同泵浦功率下光源光谱,分析得到其带宽、平均波长随泵浦功率的变化。对于光源在不同泵浦功率下的温度特性的测量,是将样机放在温度受控的封闭容器内,保持一个常值的泵浦功率,使其温度在-20~60 °C间循环,其间监测光源的输出光谱,分析整个样机的温度变化导致的平均波长、带宽和输出功率的漂移。

### 2.1 不同泵浦功率下的光谱、平均波长和带宽

图2是铒纤长度为20 m时,不同泵浦功率下的光谱。图3是光源平均波长以及带宽随泵浦功率变化的实验曲线,从图中可以看出,当泵浦功率较小时,平均波长随泵浦功率的增大而急剧向长波长方向移动,泵浦功率为40 mW左右时,斜率达到 $\frac{\partial \bar{\lambda}_s}{\partial P_{\text{pump}}} \approx +64 \text{ ppm/mW}$ ,当泵浦功率达到50 mW左右时,斜率近似为零,随后平均波长又开始随着泵浦功率的增大而减小,当泵浦功率为90 mW左右时,实验测得平均波

长受泵浦功率的影响为  $\partial\lambda_s/\partial P_{\text{pump}} \approx -6.5 \text{ ppm/mW}$ 。由于高精度光纤陀螺对大输出功率的要求不可能选择在极值点 50 mW 左右，一般选择在 90 mW 左右。以前对器件的实验分析过程中测得，在这个泵浦功率下，泵浦激光器的输出功率随温度的变化也是一个负的温度系数，在常温附近的变化梯度  $\partial P_{\text{pump}}/\partial T \approx -0.12 \text{ mW/}^\circ\text{C}$ ，这样公式(1)中第三项的贡献  $(\partial\lambda_s/\partial P_{\text{pump}})(\partial P_{\text{pump}}/\partial T)$  就是一个正的温度系数；当钕纤长度为 20 m 时测得常温附近公式(1)中的第一项，即钕纤的固有热系数是一个负的温度系数<sup>[4]</sup>，这样第三项与第一项的贡献就可以部分抵消。

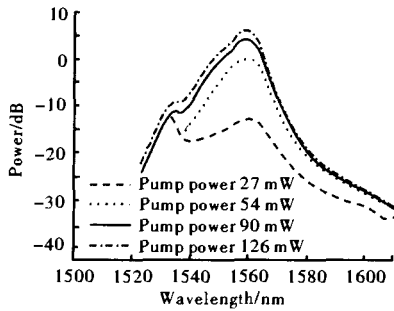


图 2 钕纤长度为 20 m 时，不同泵浦功率下的光源光谱  
Fig.2 Measured spectrum of different pump power, for Erbium-doped fiber length of 20 m

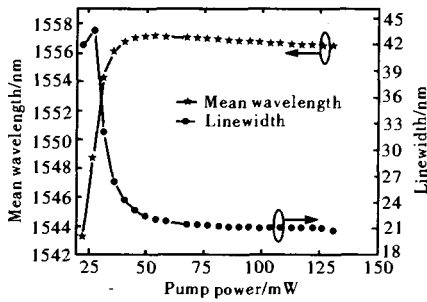


图 3 光源平均波长和带宽随泵浦功率变化的实验曲线  
Fig.3 Measured mean wavelength and linewidth versus pump power

2.2 不同泵浦功率条件下掺钕光纤光源的温度特性

图 4 是不同泵浦功率下，样机平均波长随温度的漂移曲线，都是在 -10 °C 左右存在极值点，在 25 °C 左右，泵浦功率为 70、90 和 110 mW 时，平均波长稳定性分别为 -2.78、-2.76 和 -2.85 ppm/ °C，说明在这个泵浦功率范围内，泵浦功率大小的选择对平均波长稳

定性的影响不大；图 5 是不同泵浦功率下，样机的带宽随温度变化的实验曲线，它们同样都是在 -10 °C 左右存在极值点；图 6 是不同泵浦功率下，样机的输出功率随温度的变化，它们也是在 0~10 °C 之间存在一个输出极大值，在 25 °C 左右，泵浦功率为 70 和 110 mW 时，输出功率受温度的影响大小分别 -0.011、-0.013 mW/ °C。

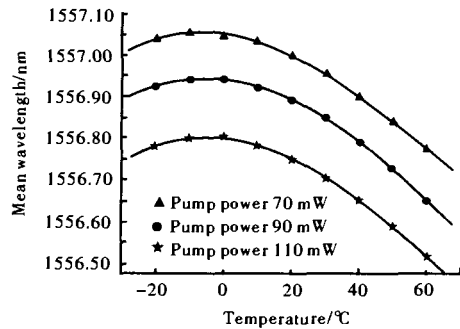


图 4 不同泵浦功率下，样机平均波长随温度漂移的实验曲线  
Fig.4 Shift curves of mean wavelength with temperature for different pump power

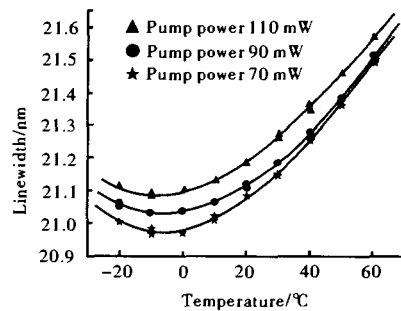


图 5 不同泵浦功率下，样机带宽随温度漂移的实验曲线  
Fig.5 Shift curves of linewidth with temperature for different pump power

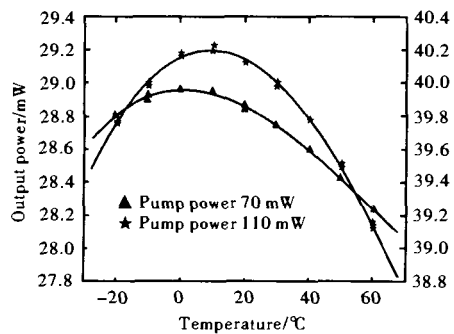


图 6 不同泵浦功率下，样机输出功率随温度漂移的实验曲线  
Fig.6 Shift curves of output power with temperature for different pump power

### 2.3 掺铒光纤光源样机的长期稳定性测试

根据实验结果,铒纤长度为 20 m 时,泵浦功率的大小对样机平均波长稳定性的影响不大,所以可以根据光纤陀螺对输出功率和带宽大小的要求来选择合适的泵浦功率。

图 7 是常温条件下,光源平均波长的稳定性曲线,泵浦功率为 90 mW,开机 60 min 后开始测量,测试时间为 360 min,环境温度在 20.6~22.1 °C 之间变化,整个测试过程中平均的波长稳定性为 4.9 ppm (峰-峰值),1 h 内短期稳定性可以达到 2 ppm 以下。

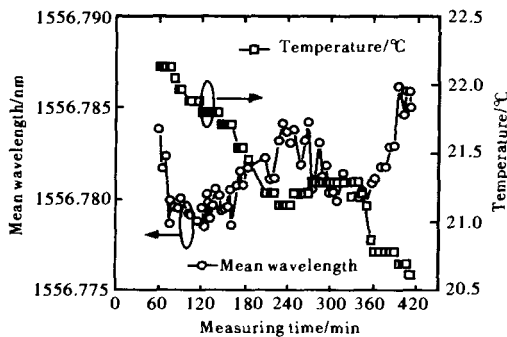


图 7 样机的平均波长稳定性测试结果

Fig.7 Test result of mean wavelength stability

## 3 结论

本文在完成铒纤长度优化设计的基础上,实验分析了泵浦功率对掺铒光纤光源平均波长以及带宽的影响,同时在-20~60 °C 的温度范围内,测量了不同泵浦功率条件下掺铒光纤光源平均波长、带宽和输出功率随温度的漂移。实验结果表明,当泵浦功率在 60~120 mW 范围内时,平均波长受泵浦功率的影响约为-6.5 ppm/mW,在这个泵浦功率范围内,泵浦功率的大小对样机平均波长稳定性的影响不大,所以根据光纤陀螺对输出功率和带宽大小的要求在此范围内选择合适的泵浦功率。最终装配样机的平均波长的长期稳定性在 1.5 °C 的温度变化范围内达到 4.9 ppm,

可以在此基础上定制合适的光纤光栅滤波器,对 ASE 光谱进行滤波,使谱形满足高精度光纤陀螺的要求。

### 参考文献:

- [1] Cutler C C,Newton S A,Shaw H J.Limitation of rotation sensing by scattering[J].Opt Lett,1980,5(9):488-491.
- [2] Bergh R A,Culshaw B,Cutler C C,et al.Source statics and the Kerr effect in fiber-optic gyroscopes[J].Opt Lett,1982,7(11):563-565.
- [3] Shuma R F,Killian K M.Superfluorescent diode(SLD) wavelength control in high performance fiber optic gyroscopes[A].Proc SPIE Fiber Gyros:10th Anniversary Conference[C].1986,719.203-207.
- [4] Lefevre H C.The Fiber -Optic Gyroscope [M].Brian Culshaw: Artech House Inc,1993.
- [5] Bergh R A,Lefevre H C,Shaw H J.An overview of fiber -optic gyroscopes[J].J Lightwave Technol,1984,LT-2:91-107.
- [6] Wiscocki P F,Fesler K,LIU K,et al.Spectrum thermal stability of Nd- and Er-doped fiber sources[A].Proc SPIE,Fiber Laser Sources and Amplifiers II [C].1990,1373.202-206.
- [7] Wiscocki P F,Digonnet M J F,Kim B Y.Wavelength stability of a high-output, broadband, Er-doped, superfluorescent fiber source pump near 980 nm [J].Opt Lett,1991,16(20):961-963.
- [8] LV Xiao-qin,GAO Feng,JIA Lu-ning,et al.Experimental study on the dependence of DPB SFS' performance on Er-doped fiber length[J].Acta Photonica Sinica(闻晓琴,高峰,贾鲁宁,等.铒纤长度对掺铒光源性能影响的实验研究.光子学报),2005,34(7):21-25.
- [9] LV Xiao-qin,GAO Feng,ZHANG Gui-cai.Parameter optimization of the Er-doped superfluorescent fiber laser used in precision fiber-optic gyroscope[A].Proceeding of the Fifth Photonics Conference in China[C](闻晓琴,高峰,张桂才.高精度光纤陀螺用超荧光掺铒光纤光源的参数设计.第五届全国光子学学术会议论文集),2004.187-189.
- [10] Wang L A,Chen C D.Characteristics comparison of Er-doped double-pass superfluorescent fiber sources pumped near 980 nm [J].IEEE Photonics Technology Letters,1997,9(4):446-448.

好消息: 据检索统计,《红外与激光工程》2004 年第 1~6 期全部被 EI 核心数据库 (compendex) 收录。这与多年来广大读者、作者对我们的支持是分不开的,在此表示感谢! 欢迎继续投稿。