

铒纤长度对掺铒光源性能影响的实验研究

闫晓琴 高 峰 贾鲁宁 张桂才

(中国航天时代电子公司研究院,北京 100854)

摘 要 实验演示了铒纤长度的选择对 1550 nm 双通后向超荧光掺铒光纤光源 (DPB SFS) 的平均波长以及谱宽性能的影响,特别是对平均波长稳定性的影响,实验分析了一 20℃~60℃ 之间光源固有平均波长的变化,最终得到了铒纤固有热系数以及整个样机的平均波长稳定性随铒纤长度变化的实验曲线,对超荧光掺铒光纤光源的器件选择和优化设计具有重要参考价值。

关键词 光纤陀螺 (FOG); 双通后向超荧光掺铒光纤光源 (DPB SFS); 固有热系数; 平均波长

中图分类号 V241.5:O43

文献标识码 A

0 引言

高精度光纤陀螺对光源的要求是:输出功率大、宽谱、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^[1]。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^[2]。超荧光掺铒光纤光源是其中的一种宽带光源。根据实验结果,超荧光掺铒光纤光源达到光纤陀螺所要求的输出功率 > 5 mW、谱宽 > 38 nm 的技术指标是容易实现的。关键的指标是平均波长稳定性,它是精密级 (0.001°/h, < 1 ppm) 和导航级 (0.01°/h, < 10 ppm) 光纤陀螺用宽谱光源的最重要的参数,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了光纤陀螺的标度因数稳定性。

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,平均波长的变化有三种主要来源:首先是掺铒光纤温度特性导致的固有的平均波长的变化,其次平均波长还会随着泵浦波长和泵浦功率变化。在实验中发现,这些光源参数的温度系数有正有负,通过对超荧光掺铒光纤光源的参数和工作条件进行优化设计,这三项的贡献可以部分抵消,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。

本文主要实验演示了铒纤长度的选择对双通后向超荧光掺铒光纤光源 (DPB SFS) 的平均波长以及带宽的影响,特别是对平均波长稳定性的影响。

1 DBP SFS 及平均波长的计算

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足够的谱宽,选择双通后向 (DPB) 结构,同时采用增益平坦滤波器对 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 nm/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、向后两个方向产生放大的自发辐射 (ASE) 信号。前向 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后输出。

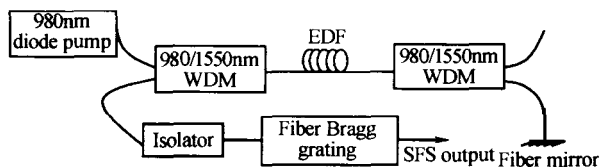


图 1 双通后向掺铒超荧光光纤光源的结构
Fig. 1 Diagram of DPB SFS configuration

本实验所用器件的各项参数如下:铒光纤由 AT&T 提供,1300 nm 处的损耗为 5 dB/km,亚稳态寿命 10.5 ms,光纤芯的半径 1.554 μm,数值孔径 0.31,铒离子浓度为 4.49 × 10²⁴ 个离子/m³,泵浦激光器的泵浦波长为 974 nm,波分复用器的插入损耗为 0.1 dB,隔离度为 30 dB,反射镜的反射率为 98%,隔离器的隔离度为 38 dB。

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,平均波长的变化有三种主要来源,可以表示为^[3]

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

式中的第一项是由掺铒光纤温度特性导致的固有的平均波长 $\bar{\lambda}_s$ 的变化,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,可以减少上述几种因素的影响:固有项主要由光纤长度控制,第二项由泵浦波长控制,第三项由泵浦功率控制。

平均波长 $\bar{\lambda}_s$ 可以通过对光谱功率进行加权平均由下式计算出^[3]

$$\bar{\lambda}_s = \frac{\sum_{j=1}^n \lambda_j P(\lambda_j)}{\sum_{j=1}^n P(\lambda_j)} \quad (2)$$

在大的信号功率条件下, 受附加噪声限制的 SFS 的信噪比与光源的带宽成正比, 在下文中, SFS 的带宽的定义为^[3]

$$\Delta\lambda = \frac{[\sum_{j=1}^n P(\lambda_j) \Delta\lambda(\lambda_j)]^2}{\sum_{j=1}^n P^2(\lambda_j) \Delta\lambda(\lambda_j)} \quad (3)$$

2 实验及结果分析

实验采用图 1 所示的光源结构, 对一段初始长度为 27 m 的铒纤进行实验, 利用光谱仪记录不同铒纤长度下光源光谱, 分析得到其带宽、平均波长随铒纤长度的变化. 对于光源固有热系数的测定, 是将铒光纤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 $-20^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$ 间循环, 其间监测光源的输出光谱, 分析铒纤的温度变化导致的平均波长漂移, 从而得到光源的固有热系数. 对于整个光源稳定性的测试采用与光源固有热系数测试相似的方法, 不同的是这次将整个光源放在温度受控的封闭容器内.

2.1 铒纤长度对光谱、平均波长和带宽的影响

图 2 是 100 mW 泵浦功率下, 采用不同铒纤长度后得到的输出光谱, 从图中可以看出当铒纤的长度为 12 m 左右的时候 1530 nm 辐射和 1558 nm 辐射几乎相等, 低于该长度以 1530 nm 辐射为主, 超出该长度以 1558 nm 辐射为主.

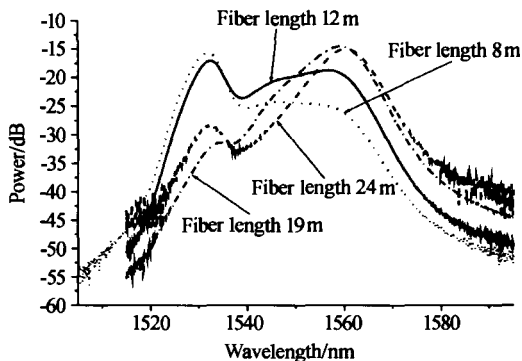


图 2 不同铒纤长度下的光谱(泵浦功率 100 mW)
Fig. 2 Measure spectrum of different fiber length, with pump power of 100 mW

图 3 是泵浦功率分别为 100 mW 和 120 mW 时, 光源的平均波长以及带宽随铒纤长度变化的实验曲线, 从图中可以看出, 当铒纤长度为 12 m 左右时, 谱宽达到一个最大值, 随着铒纤长度的增加, 平均波长向长波长方向移动.

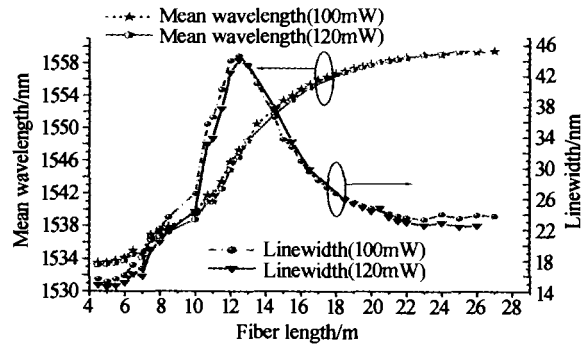


图 3 不同泵浦功率下, 平均波长以及带宽随铒纤长度变化的实验曲线

Fig. 3 Measured mean wavelength and linewidth versus fiber length with different pump power

2.2 铒纤固有热系数的测定

铒纤固有热系数, 也就是式(1)中的第一项, 由每种 SFS 结构中吸收和辐射的相对重要性以及这些过程的谱随温度的漂移的符号和振幅决定. 图 4 是泵浦功率为 100 mW 时, 不同的铒纤长度下, 测得的铒纤的固有热系数导致的平均波长漂移的实验曲线. 从图中可以看出, 当铒纤长度为 24 m 时, 由铒纤固有的温度特性导致的平均波长漂移是一个负温度系数, 拟合直线的斜率为 $-0.005 \text{ nm}/^\circ\text{C}$, 即式(1)中第一项铒纤的固有热系数导致的平均波长漂移约为 $-3.2 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$; 当铒纤长度为 19 m 时, 由铒纤的固有热系数导致的平均波长随温度的漂移是一

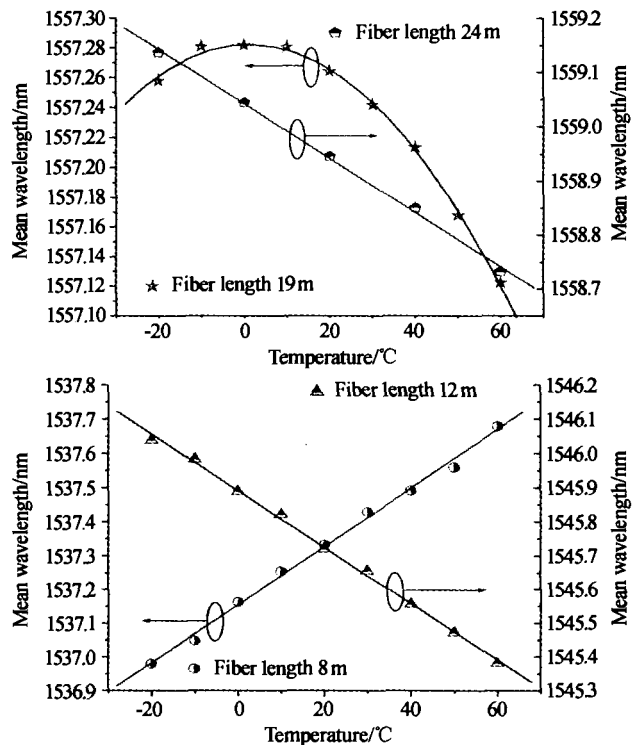


图 4 不同铒纤长度下, 铒纤的固有热系数导致的平均波长漂移曲线(泵浦功率 100 mW)

Fig. 4 Shift of the mean wavelength with temperature for different fiber length

个抛物线,常温 20°C 左右的斜率约为 $-1.1\text{ppm}/^{\circ}\text{C}$,高温 55°C 左右的斜率约为 $-3.2\text{ppm}/^{\circ}\text{C}$;当铒纤的长度为 12m 时,由铒纤的固有热系数导致的平均波长随温度的漂移又基本上变成了线性关系,贡献约为 $-5.3\text{ppm}/^{\circ}\text{C}$;当铒纤的长度为 8m 时,由铒纤的固有热系数导致的平均波长随温度的漂移是一个正的温度系数,贡献约为 $+5.5\text{ppm}/^{\circ}\text{C}$.

图5是不同温度下,固有热系数随铒纤长度变化的实验曲线.对于这种双通结构,铒纤长度在接近 19m 时获得了比较好的稳定性,从图中可以看出,当铒纤长度接近 10.5m 左右的时候,曲线在这些点左右通过零,但在实际的实验过程中发现,当光纤长度为 10.5m 左右的时候,光谱不易稳定,原因需要进一步的分析研究.

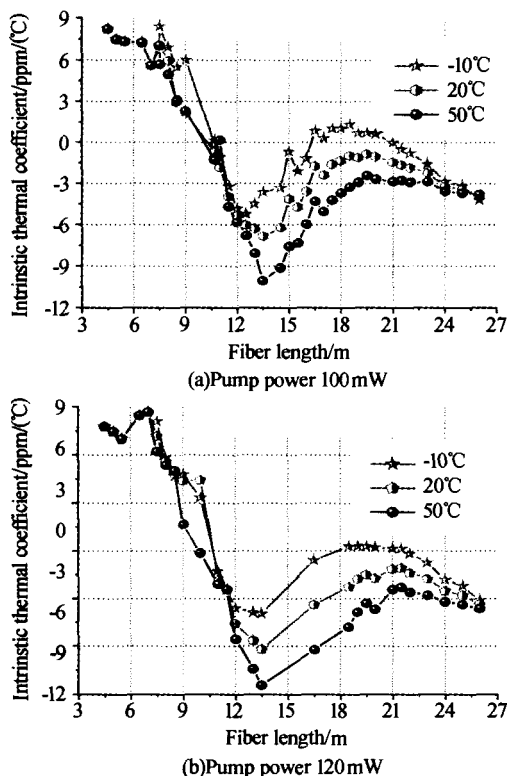


图5 不同温度条件下,固有热系数随铒纤长度变化的实验曲线

Fig. 5 Intrinsic thermal coefficient versus fiber length for several temperature point

2.3 光源的稳定性及铒纤长度的选择

图6是不同温度条件下,整个掺铒光源的平均波长稳定性随铒纤长度变化的实验曲线.实验结果与固有热系数随铒纤长度变化的实验曲线十分相似,实验过程中同时发现泵浦激光器对平均波长稳定性的贡献是一个正的系数,量级在 $+0.5\text{ppm}/^{\circ}\text{C}$ 左右.这说明所装配的DPB SFS样机的平均波长稳定性主要是受铒纤长度的影响,也就是说平均波长不稳定性贡献主要来自于式(1)中的第一项.

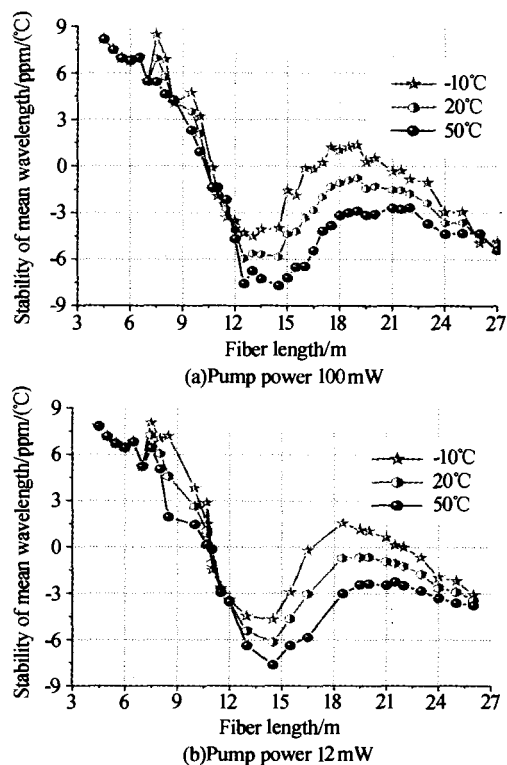


图6 不同温度条件下,掺铒光源平均波长稳定性随铒纤长度变化的实验曲线

Fig. 6 SFS mean wavelength stability versus fiber length for several temperature point

根据实验结果,没有采用光纤光栅滤波器进行滤波的DPB SFS达到光纤陀螺所要求的输出功率 $>5\text{mW}$ 很容易实现,根据谱的宽度,最佳光纤长度为 12m .但是关键的指标是平均波长稳定性,光纤长度接近 19m 时DPB SFS获得了最佳稳定性,但是在这个长度下的谱形不是很理想,滤波后功率衰减比较大,可以根据实际的工程要求来选择铒纤的长度.

3 结论

本文实验演示了铒纤长度的选择对 1550nm DPB SFS的平均波长以及带宽的影响,特别是对平均波长稳定性的影响,实验分析了 $-20^{\circ}\text{C}\sim 60^{\circ}\text{C}$ 之间光源固有平均波长的变化,最终得到了固有热系数以及整个样机的平均波长稳定性随铒纤长度变化的实验曲线,实验发现研制的DPB SFS样机的平均波长稳定性主要受到铒纤长度的影响,也就是说平均波长不稳定性贡献主要来自于铒纤的固有热系数,这对超荧光掺铒光纤光源的器件选择和优化设计具有重要参考价值.结合之前的仿真结果确定合适的铒纤长度、泵浦波长和泵浦功率并最终确定ASE光谱,然后针对该ASE光谱制作出合适的光纤光栅滤波器,对ASE光谱进行平坦滤波,使谱宽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. *Opt Lett*, 1980, **5**(9): 488 ~ 491
- 2 Bergh R A, Culshaw B, Cutler C, *et al.* Source statics and the Kerr effect in fiber-optic gyroscopes. *Opt Lett*, 1982, **7**(11): 563 ~ 565
- 3 Wyscocki 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. *Opt Lett*, 1991, **16**(20): 961 ~ 963

Experimental Study on the Dependence of DPB SFS' Performance on Er-Doped Fiber Length

Lü Xiaoqin, Gao Feng, Jia Luning, Zhang Guicai

The Academy of China Aerospace Times Electronics Corporation, Beijing 100854

Received date: 2004-04-15

Abstract The experimental investigations on double-pass backward Erbium-doped superfluorescent fiber source (DPB SFS) were presented. The dependence of the mean wavelength, spectral linewidth, and thermal stability on the Erbium-doped fiber length were measured. The source intrinsic thermal coefficients for several fiber length were measured by rapidly cycling the fiber temperature between -20°C and 60°C . The curve of the intrinsic thermal coefficient and the stability of DPB SFS mean wavelength versus fiber length under several temperature point were obtained. The result of experiments has significant reference value to the selection of devices and proper design of Erbium-doped superfluorescent fiber sources.

Keywords Fiber-optic gyroscope (FOG); Double-pass backward Erbium-doped superfluorescent fiber source (DPB SFS); Intrinsic thermal coefficient; Mean wavelength



Lü Xiaoqin was born in 1979. She received the B. S. degree in photoelectronics from Shandong University and M. S. degree in optics from Nanjing University of Science & Technology, in 2000 and 2003, respectively. Now she is currently working in the Academy of China Aerospace Times Electronics Corporation. Her research interests are optics, optical fiber grating, and erbium-doped superfluorescent fiber source.