

文章编号: 0253-2239(2001)03-0300-05

高稳定宽频带掺铒光纤超荧光光源

沈林放 钱景仁

(中国科技大学电子工程与信息科学系光纤实验室, 合肥 230027)

摘要: 理论研究了双程后向结构掺铒光纤超荧光光源的特性。结果表明, 在任意反射镜参数下, 只要选取适当的掺铒光纤长度, 该结构光源总能实现不依赖于抽运功率的平均波长高稳定性运行; 在光源高稳定性的前提下, 反射镜参数优化后的该结构光源具有较宽的频带宽度和较高的抽运效率。

关键词: 超荧光光纤光源; 掺铒光纤; 光纤陀螺

中图分类号: TN25 文献标识码: A

1 引 言

由于高精度光纤陀螺(FOG)(尤其在航天惯性导航级)对所用光源的需求, 激光二极管(LD)抽运的掺铒光纤超荧光光源(SFS), 近 10 年来取得了巨大的进展。高精度光纤陀螺的所用光源必须具有平均波长高稳定性和宽频带的性质, 为此, 多种超荧光光源结构已被相继提出并得到研究^[1-3]。人们最早在对单程后向(SPB)结构超荧光光源的研究中发现, 选取适当的掺铒光纤(EDF)长度, 在抽运功率很宽的范围, 光源的平均波长变化不敏感^[1,2,4]。近年来, 在双程后向(DPB)结构超荧光光源的实验上同样获得了这种相对于抽运功率的高稳定性^[5]。双程后向的超荧光光源与单程后向的超荧光光源相比, 该结构光源增加了一个反射镜, 由此产生一个有实际意义的问题: 能否通过优化反射镜参数, 从而使光源既具有高稳定性又有宽频带的特征? Wang 等人^[6]研究了双程后向的超荧光光源输出带宽对反射镜反射率的依赖关系, 当全反射时得到了最宽的输出带宽, 但他们在实验中固定了掺铒光纤的长度。我们认为, 由双程后向的超荧光光源高稳定性所决

定的掺铒光纤优化长度应依赖于反射镜的反射率, 而反射镜的作用又使该结构光源的输出带宽对掺铒光纤长度的依赖性加强。如果加上光源的高稳定性条件, 输出带宽对掺铒光纤长度的依赖关系将会发生根本的变化。就我们所知, 除双程后向结构外, 其他结构超荧光光源的特性都得到了细致的理论模拟分析, 且理论结果与实验符合得很好^[1]。本文的目的是理论模拟双程后向的超荧光光源的特性。我们的理论分析将表明, 在光源高稳定性的前提下, 通过对反射镜参数的优化, 双程后向的超荧光光源将具有宽于单程后向的超荧光光源的频带宽。

2 物理模型

考虑双程后向结构超荧光光源如图 1 所示。从图中可看出, 光源的反射镜实际上是由波分复用器(WDM)、衰减器和光纤端面反射镜组成的系统。衰减器设想是靠直径很小的光纤圈的弯曲损耗来实现衰减作用, 这样, 反射镜系统的反射率可以通过光纤圈的圈数(N_{coil})来调节。光源输出端的光隔离器, 是用来消除高精度光纤陀螺的反馈信号。

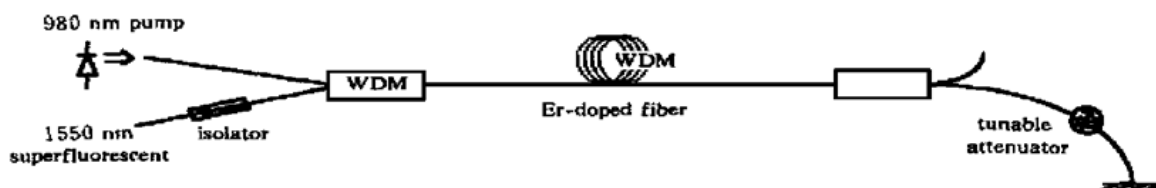


Fig. 1 Schematic of SFS in double-pass backward configuration

双程后向结构超荧光光源的特性, 是光信号与 Er 离子的相互作用及反射镜对光信号的作用的总

的结果。考虑光源的抽运波长在 980 nm 左右, 可以用等效的三能级系统来描述其物理过程。对光源的信号频谱分成 N 个区域, 则光源的性质完全由 $2N + 1$ 束光沿掺铒光纤的演化情况决定, 即前/后向传播

的光信号功率 $P_s^\pm(z, \nu_i)$ ($i = 1, 2, \dots, N$), 前向传播的抽运光功率 $P_p(z)$ 。考虑抽运光和信号光在光纤中都以 LP_{01} 模传播, 则它们沿掺铒光纤的演化遵从下列传播方程

$$\frac{dP_s^\pm(z, \nu_{s,i})}{dz} = \pm \iint_{S_\infty} dr d\phi \phi_s(r, \phi, \nu_{s,i}) r F \mp \nu_{s,i} P_s^\pm(z, \nu_{s,i})$$

$$F = \{ \sigma_e(\nu_{s,i}) n_u(z, r, \phi) - \sigma_a(\nu_{s,i}) [n_1(z, r, \phi) + n_{ab}(r)] \} P_s^\pm(z, \nu_{s,i}) + 2\sigma_e(\nu_{s,i}) n_u(z, r, \phi) h\nu_{s,i} \Delta\nu_{s,i} \quad (i = 1, 2, \dots, N)$$

$$\frac{dP_p(z)}{dz} = - \iint_{S_\infty} dr d\phi \phi_p(r, \phi) r \{ \sigma_a(\nu_p) \times [n_1(z, r, \phi) + n_{ab}(r)] + \sigma_{esa} n_p(z, r, \phi) \} P_p(z) - \nu_p P_p(z), \quad (1)$$

这里, ν_i 、 ν_s 、 ν_p 分别表示第 i 束光频、信号光频和抽运光频, σ_a 和 σ_e 分别为掺铒离子的吸收和发光截面, σ_{esa} 为铒离子的激发态吸收截面; $\phi_{s,p}$ 分别为信号光和抽运光模式的归一化功率分布函数; $\nu_{s,p}$ 为光纤的本底吸收系数; n_{ab} 是掺铒光纤中的铒离子对密度。铒离子的激光上能级、下能级及抽运能级的粒子数密度, 即 n_u 、 n_1 和 n_p 可以从速率方程求得^[7]。

(1) 式的边界条件为

$$\begin{aligned} P_s^+(0, \nu_{s,i}) &= 0, \\ P_s^-(L, \nu_{s,i}) &= R_{s,i} P_s^+(L, \nu_{s,i}) \\ (i &= 1, 2, \dots, N), \\ P_p(0) &= P. \end{aligned}$$

这里, L 为掺铒光纤长度, $R_{s,i}$ 为反射镜对频率为 $\nu_{s,i}$ 的信号光的反射率。

3 数值分析和结果

本文的数值分析采用 Al 和 Ge 共掺杂的掺铒光纤^[8], 铒离子的吸收和发光截面随波长的分布如图 2 所示。

假设 Er 离子在光纤芯层内均匀分布, 数值模拟中用到的有关掺铒光纤和反射镜的主要参数为: 纤芯半径 $a = 1.65 \mu\text{m}$, 折射率差 $\Delta n = 0.015$, 数值孔径 $NA = 0.21$; Er 离子密度 $n_t = 5.7 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 在波长 $1.53 \mu\text{m}$ 处的小信号吸收率为 8 dB/m , 在抽运波长处的小信号吸收率为 5.3 dB/m ; 离子相对浓度

$n_{ab}/n_t \approx 4\%$, 光纤本底吸收率 $\nu_p = \nu_s = 0.03 \text{ dB/m}$; 反射镜的最大反射率 $R_0 = 0.9$, 衰减器的心轴直径 $d_c = 16.3 \text{ mm}$, 对应于波长 $1.53 \mu\text{m}$ 处每一光纤圈引起 -1 dB 的衰减。

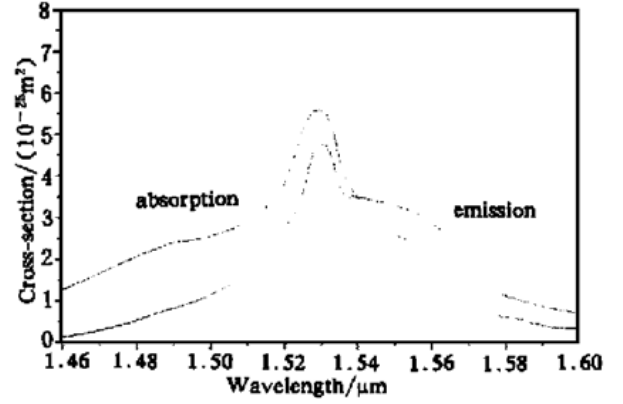


Fig. 2 Emission and absorption cross section of Er ions

首先, 来判断这种掺铒光纤构成的单程后向结构超荧光光源的一些性质. 并且设想抽运功率为 100 mW . 数值分析表明, 当掺铒光纤长度为 24.5 m 时, 单程后向超荧光光源表现出了平均波长 ($\bar{\lambda}$) 不依赖于抽运功率 (P) 的高稳定性. 它在 $80 \text{ mW} \sim 160 \text{ mW}$ 范围内, 有

$$\frac{1}{\bar{\lambda}} \left| \frac{d\bar{\lambda}}{dP} \right| \leq 4 \times 10^{-6} / \text{mW}. \quad (2)$$

实验上可控制抽运功率扰动在 0.1 mW 内。

图 3 是在 5 个不同抽运功率下该超荧光光源的输出信号功率谱. 对应 $P = 100 \text{ mW}$, 光源的输出信号功率为 29 mW , 带宽为 21 nm . 带宽定义公式为

$$\Delta = \left[\int P_s(\lambda) d\lambda \right]^2 / \int P_s^2(\lambda) d\lambda, \quad (3)$$

这里 $P_s(\lambda)$ 是输出信号的功率谱. 带宽的另一种定义为

$$\Delta\lambda = \int P_s(\lambda) d\lambda / P_{s, \text{peak}}, \quad (4)$$

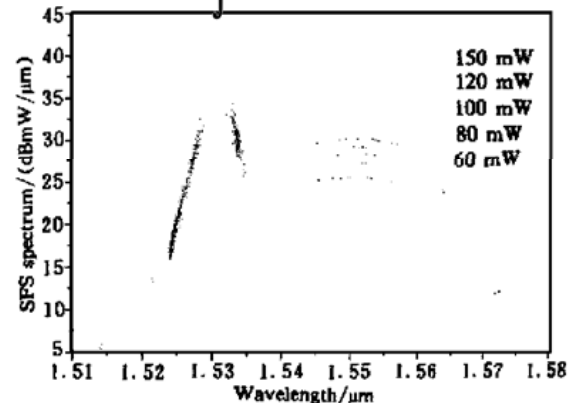


Fig. 3 Output spectra of SPB SFS for $L = 24.5 \text{ m}$ at labeled pump powers

[$P_{s, peak}$ 是 $P_s(\lambda)$ 的峰值], 上述输出信号对应的值仅为 9.5 nm, 我们记这个带宽为 $\Delta\lambda^*$ 。我们看到, 这里算出的输出信号功率和带宽及输出信号功率谱形, 与这类掺铒光纤单程后向超荧光光源的实验结果都相符^[2]。

现在来分析双程后向结构超荧光光源的特性。与单程后向超荧光光源相比, 双程后向超荧光光源具有较高的抽运效率, 通常在低于 100 mW 的抽运功率下能输出对高精度光纤陀螺足够高的信号功率, 为此不妨先设想抽运功率为 80 mW。数值分析表明, 在任意反射镜参数下, 即任意 N_{coil} , 只要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抽运功率的高稳定性 ($d\bar{\lambda}/dP \approx 0$) 运行, 稳定状态下光源的输出信号带宽密切地依赖于反射镜参数。

图 4 给出了双程后向超荧光光源在不同反射镜参数下的掺铒光纤优化长度和相应的输出带宽 $\Delta\lambda$ 。从图中可看出, 掺铒光纤优化长度随 N_{coil} 增大或反射率减小而单调增大。在 $N_{coil} = 0$ (最大反射率) 情形, 高稳定光源有 $\Delta\lambda = 24$ nm, 略大于高稳定单程后向超荧光光源的结果; $\Delta\lambda$ 随 N_{coil} 增大而增大, 当 $N_{coil} = 8$ 时, 达到了其最大值, 即 $\Delta\lambda = 29$ nm, 随后开始下降。我们发现, 在 $N_{coil} = 8$ 情形, 高稳定双程后向超荧光光源的 $\Delta\lambda^*$ 也有 19.6 nm, 可见这是一个非常可靠的宽频带。

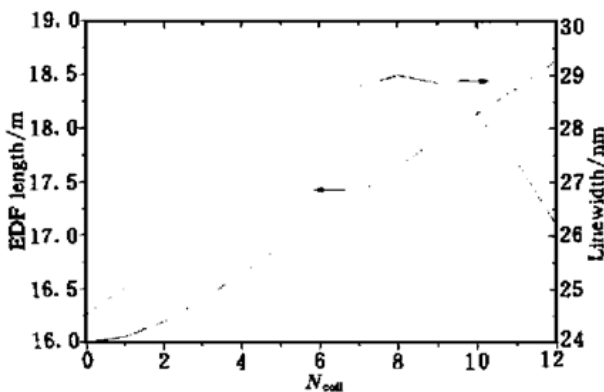


Fig. 4 The dependence of optimal EDF length and resulted linewidth on the reflector parameter of N_{coil} for DPB SFS pumped with 80 mW

图 5 给出了 $N_{coil} = 0, 8, 12$ 时, 对应的高稳定双程后向超荧光光源的输出功率谱。可以看出, 输出功率谱总具有双峰结构。当 N_{coil} 较小或反射率较大时, 光源的输出功率谱以长波长(约 1.56 μm) 峰占主导, 如 $N_{coil} = 0$, 即近似全反射情形; 当 N_{coil} 较大时, 输出功率谱则以短波长(约 1.53 μm) 峰占主导,

如 $N_{coil} = 12$ 情形。显然, 单程后向超荧光光源可以看成是后一种情况的极限情形, 即 $N_{coil} \rightarrow \infty$, 抽运功率为 80 mW 的高稳定单程后向超荧光光源的输出功率谱形与 $P = 100$ mW 情形的基本相同。所以可以理解, 不管衰减器给反射镜带来怎样的频谱响应特征, 总能找到一个适中的衰减器参数, 使光源在高稳定性的前提下, 输出双峰平衡的信号谱形, 从而使光源获得最大的输出带宽。

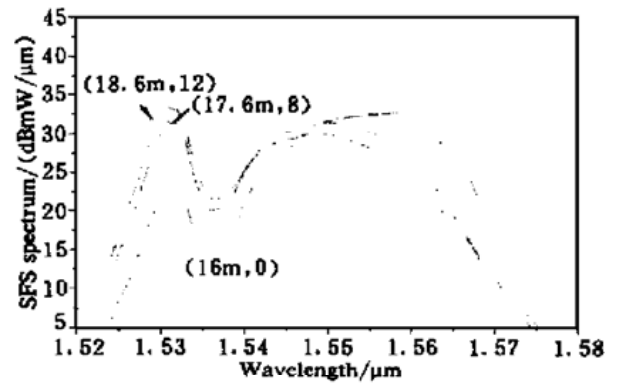


Fig. 5 Output spectra of DPB SFS pumped with 80 mW for different EDF length and N_{coil} labeled

进一步分析反射镜参数优化后(即 $N_{coil} = 8$) 的双程后向超荧光光源的基本性质。图 6 给出了在不同掺铒光纤长度(L) 下光源的 $\bar{\lambda}(P)$ 特征。从图中可看出, $\bar{\lambda}(P)$ 曲线的峰点位置随 L 增大而向高功率方向移动。对应 $L = 17.6$ m, $\bar{\lambda}(P)$ 有峰点位置在 80 mW 处, 而且在 70 mW~100 mW 的抽运区间有

$$\frac{1}{\bar{\lambda}} \left| \frac{d\bar{\lambda}}{dP} \right| \leq 6 \times 10^{-6} / \text{mW}. \quad (5)$$

$N_{coil} = 8$ 情形下的双程后向超荧光光源, 选取适当的掺铒光纤长度, 在 60 mW~100 mW 抽运区间内该光源能实现不依赖于抽运功率的平均波长高稳定性 ($d\bar{\lambda}/dP \approx 0$)。

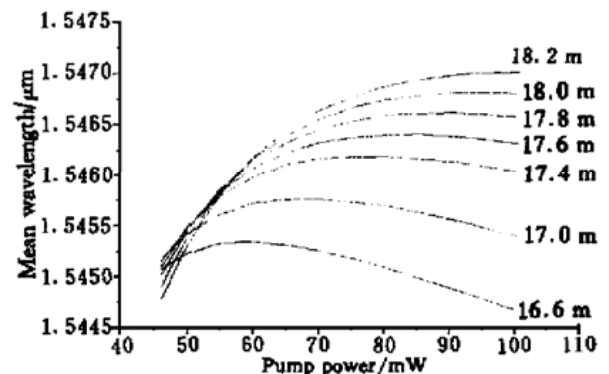


Fig. 6 $\bar{\lambda}(P)$ characteristics for $L = 18.2$ m, 18.0 m, 17.8 m, 17.6 m, 17.4 m, 17.0 m, 16.6 m for $N_{coil} = 8$

图 7 给出了在高稳定性条件下光源 ($N_{\text{coil}} = 8$) 的输出信号功率和带宽 ($\Delta\lambda$) 与抽运功率的依赖关系。当抽运功率从 60 mW 增大到 100 mW 时, 输出功率相应地从 19.7 mW 增大到 36.4 mW。在 $P = 80$ mW 时, 输出功率为 28 mW, 与在 100 mW 抽运作用下的高稳定单程后向超荧光光源的输出功率近似相等。从图 7 中可以看出, $\Delta\lambda$ 仅在 28.40 nm ~ 29.25 nm 范围内变化, 这与信号平均波长在该抽运功率区间内的微小变化相符。上面计算中, 对每一个抽运功率, 已取了不同的 L , 以保证双程后向超荧光光源的平均波长的高稳定性。可见, $N_{\text{coil}} = 8$ 这个优化参数, 也适用于 60 mW ~ 100 mW 区间内的任一抽运功率作用下的双程后向超荧光光源。

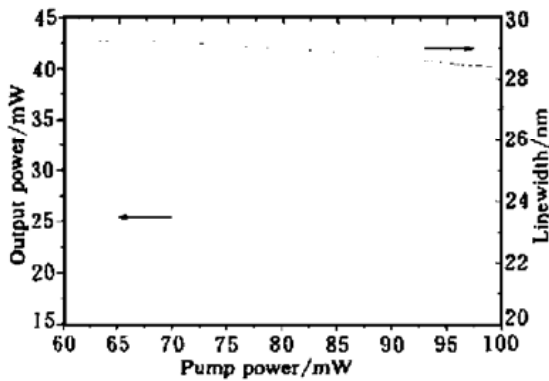


Fig. 7 Output power and $\Delta\lambda$ of high stable DPB SFS ($N_{\text{coil}} = 8$) versus pump power

最后, 分析高精度光纤陀螺的信号反馈效应对双程后向超荧光光源的影响。作为一个例子, 考虑如下一组双程后向超荧光光源参数: $d_c = 16.3$ mm, $N_{\text{coil}} = 8$; $P = 80$ mW, $L = 17.6$ m。如果忽略高精度光纤陀螺的信号反馈效应, 则上述光源将具有高稳定性和宽频带的性质。图 8 给出了光源的平均波长和带宽随高精度光纤陀螺信号反馈强度的变化关系。结果表明, 当反馈强度小于 -65 dB 时, 高精度

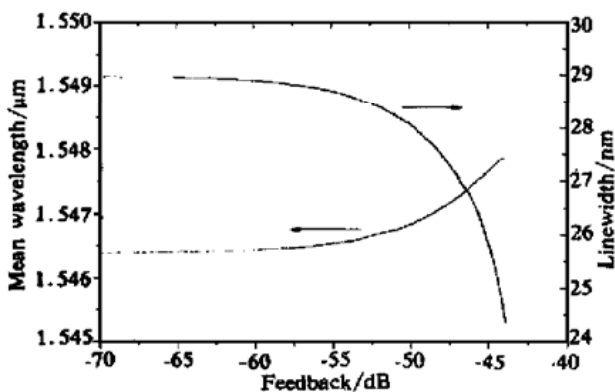


Fig. 8 Variations of $\bar{\lambda}$ and $\Delta\lambda$ with feedback from FOG

光纤陀螺的信号反馈效应可忽略; 当信号反馈增强到 -59 dB 时, 光源的平均波长出现了 10^{-5} /dB 的不稳定性 (开环和闭环高精度光纤陀螺可控制反馈扰动分别在 1 dB 和 0.1 dB 内); 当信号反馈强度大于 -44 dB 时, 光源趋于激光振荡, 导致光源的带宽急剧下降 (见图 8)。高精度光纤陀螺的信号反馈强度一般在 -29 dB 左右, 可见在光源的输出端加光隔离器是必要的。

结论 给出了有关双程后向结构超荧光光源特性的理论分析。结果表明, 在任意反射镜参数下, 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抽运功率的高稳定性运行; 高稳定性光源的输出信号带宽与反射镜参数密切相关。数值分析表明, 通过优化反射镜参数, 可使双程后向超荧光光源在高稳定性的前提下获得最大的输出带宽。以较保守的公式计算, 这个最大带宽近似为 20 nm, 相比之下, 高稳定单程后向超荧光光源的仅在 10 nm 左右。此外, 高稳定双程后向结构超荧光光源具有明显高于高稳定单程后向超荧光光源的抽运效率。总之, 全面优化后的双程后向超荧光光源具有既高稳定性又宽频带的特征, 从而很好地满足了航天级光纤陀螺对光源的高标准要求, 并在整体性能上明显优于其他结构超荧光光源。

理论分析也表明, 在 DPS 超荧光光源的输出端加光隔离器是必需的, 但隔离器的作用与其是用来防止光源形成激光, 不如说要用于消除高精度光纤陀螺反馈信号引起的光源不稳定性。

参 考 文 献

- [1] Wysocki P F, Digonnet M J F, Kim B Y *et al.*. Characteristics of erbium-doped superfluorescent fiber sources for interferometric sensor applications. *J. Lightwave Technol.*, 1994, **12**(3): 550~ 567
- [2] Hall D C, Burns W K, Moeller R P. High stability Er-doped superfluorescent fiber sources. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(7): 1452~ 1460
- [3] Wagener J L, Digonnet M J F, Shaw H J. High stability fiber amplifier source for the fiber optic gyroscope. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(9): 1689~ 1694
- [4] Hall D C, Burns W K. Wavelength stability optimization in Er-doped superfluorescent fiber sources. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(8): 653~ 654
- [5] Wang L A, Chen C D. Stable and broadband Er-doped superfluorescent fiber sources utilizing double-pass backward configuration. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(19): 1815~ 1817
- [6] Wang L A, Chen C D. Characteristics comparison of Er-doped double-pass superfluorescent fiber sources pumped near 980

- nm. *Photon. Technol. Lett.*, 1997, **9**(4): 446~ 448
- [7] Desurvire E. *Erbium-Doped Fiber Amplifiers*. New York: John Wiley, 1994
- [8] Barnes, W L, Laming R I, Tarbox E J *et al.*. Absorption and emission cross section of doped silica fibers. *J. Quant. Electron.*, 1991, **QE 27**(4): 1004~ 1010

High Stability and Broad Band Erbium-Doped Superfluorescent Fiber Source

Shen Linfang Qian Jingren

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

(Received 20 September 1999; revised November 1999)

Abstract Erbium-doped superfluorescent fiber sources (SFS) pumped near 980 nm in double-pass backward (DPB) configuration have been characterized through theoretical simulation. The results indicate that for a DPB SFS with a reflector of any reflectance, the pump-power independent mean-wavelength operation can always be achieved by properly adjusting the erbium-doped fiber (EDF) length. In the case of high stable mean-wavelength operation, the DPB SFS with the optimized reflector has a linewidth and pump efficiency obviously larger than SFSs in other configurations.

Key words superfluorescent fiber source; erbium-doped fiber; fiber optical gyroscope