

C+L 波段宽带增益平坦铋基掺铒光纤放大器的设计

周亚训, 徐星辰

(宁波大学 信息科学与工程学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 基于光纤放大器增益谱的宽带平坦化发展需要, 设计了一个两段铋基掺铒光纤(Bi-EDF)级联并携带一个 C 波段(1 530~1 565 nm)宽带光纤布拉格光栅(FBG)的双通结构型铋基掺铒光纤放大器(Bi-EDFA), 从理论上研究了其对输入信号的放大特性。研究表明:FBG 的引入可以使 C 和 L 波段(1 570~1 620 nm)信号分别经历不同长度 Bi-EDF 的双向传输, 各自获得高增益放大, 实现增益谱的宽带平坦化。在 200 mW 的 1 480 nm 双向对称泵浦下, 第一级和二级 Bi-EDF 长度分别为 50 cm 和 170 cm 时, 对于波长间隔为 2 nm、每路功率为 -30 dBm 的 56 路 C+L 波段信号的输入, Bi-EDFA 高于 30 dB 的增益带宽达到了 90 nm(1 530~1 620 nm), 平均增益为 35.7 dB, 增益起伏仅为 2.3 dB。同时, 噪声系数得到明显改善。研究结果对于研制具有宽带、增益平坦的 C+L 波段 Bi-EDFA 具有实际指导意义。

关键词: 铋基掺铒光纤放大器; 光纤布拉格光栅; 信号增益; 宽带; 平坦化

中图分类号: TN929.11 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2012)08-2119-06

Design of C+L-band broad gain-flattened bismuth-based erbium-doped fiber amplifier

Zhou Yaxun, Xu Xingchen

(College of Information Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: In order to meet the developing needs of broad amplification as well as gain-flattened operation for fiber amplifier, a double-pass structure of bismuth-based erbium-doped fiber amplifier (Bi-EDFA) with the incorporation of C-band (1 530–1 565 nm) broad fiber Bragg grating (FBG) in between the two cascaded segments of bismuth-based erbium-doped fiber (Bi-EDF) was designed, and the amplifying performances of Bi-EDFA were presented theoretically. The results indicate that a broad amplification and gain-flattened spectrum can be achieved with the aid of the simultaneously obtained high gain of the C-band and L-band (1 570–1 620 nm) signals due to their experiencing a different length bi-directional transmission in Bi-EDF after the incorporation of FBG. A gain bandwidth of 90 nm with average gain 35.7 dB and gain variation of approximately ± 2.3 dB within the wavelength range from 1 530 nm to 1 620 nm are obtained under the conditions of the 1 480 nm bi-directional symmetrical pumping with pump power of 200 mW, the first and second Bi-EDF length of 50 cm and 170 cm, and 56-channel signals of C+L band with interval of 2 nm and each power of -30 dBm are inputted simultaneously. Meanwhile, the noise

收稿日期: 2011-12-22; 修订日期: 2012-01-19

基金项目: 国家自然科学基金(61178063); 浙江省研究生创新科研项目(YK2010048); 宁波市自然科学基金(2010A610172); 宁波“新型光电功能材料及器件”创新团队项目(2009B21007); 宁波大学王宽诚幸福基金和胡岚优秀博士基金

作者简介: 周亚训(1965-), 男, 教授, 博士, 主要从事特种宽带玻璃和宽带光纤放大器的研究。Email: zhouyaxun@nbu.edu.cn

figure of Bi-EDFA is improved evidently. The theoretical studies will provide practical significance for a new design of C+L-band Bi-EDFA with broad and flattened gain.

Key words: Bi-EDFA; FBG; signal gain; broadband; flattened gain

0 引言

掺铒光纤放大器(EDFA)与波分复用(WDM)技术的联合运用是当前光纤通信系统的发展主流。目前,光纤通信系统中广泛使用的是石英基质掺铒光纤放大器(Si-EDFA),主要工作在第三通信窗口 C 波段区域(1 530~1 565 nm)。随着现代通信网络的迅速发展和新的多媒体数据传输服务的不断涌现,长距离光纤传输系统对于通信容量和系统扩展的需求日益膨胀。显然,仅有 35nm 放大带宽的常规 Si-EDFA 已远远不能满足未来高速大容量通信传输的发展需求,开发在现有 C 波段基础上向 S 波段(1 480~1 520 nm)和 L 波段(1 570~1 610 nm)区域扩展,实现 S+C、C+L 或 S+C+L 波段放大的宽带 EDFA 已成当务之急^[1-2]。这其中,铋酸盐玻璃基质掺铒光纤放大器(Bi-EDFA)以其极高的单位长度增益和 C+L 波段宽带放大特性,以及可以实现与普通石英传输光纤直接熔接等特点引起人们关注^[3-4],已成为当前宽带 EDFA 领域的研究热点。

EDFA 的光信号放大是基于信号光、泵浦光与增益介质即掺铒光纤(EDF)的相互作用,利用掺杂铒离子(Er^{3+})在激发态和基态中相应 Stark 子能级间的受激辐射跃迁实现的。由于 Stark 子能级上 Er^{3+} 离子数分布的差异以及相应 Stark 子能级间跃迁几率的不同,各波长信号得到的增益并不相同,呈现出 EDFA 本征增益谱型并不平坦的特征。显然,EDFA 增益谱的不平坦性将极大地限制了其可用的增益带宽。因此,对于宽带 EDFA 而言,增益谱的平坦化成为了其设计过程中必须要考虑的一个现实问题。目前,对于 EDFA 进行增益平坦主要采用后接一个透射谱与增益谱相反的滤波器(长周期光纤光栅^[5]、啁啾光纤光栅^[6]和介质薄膜滤波器^[7]等),通过削减增益峰的原理来实现增益谱的平坦化,但这样不可避免地带来了 EDFA 信号增益或输出功率的整体下降。

文中选择新型铋酸盐玻璃基质掺铒光纤放大器(Bi-EDFA)为研究对象,设计了一个宽带光纤布拉格光栅(FBG)两段级联 Bi-EDF 的双通结构,在保持高增益放大的同时,进行了 Bi-EDFA 宽带、增益平坦化的理论研究。当前,对于 Bi-EDFA 的理论研究还非常缺乏,因此文中研究结果对于 Bi-EDFA 的实际设计和应用具有一定指导意义。

1 实验基础

宽带 Bi-EDFA 的增益基质选用组分为 $43\text{Bi}_2\text{O}_3-30\text{B}_2\text{O}_3-27\text{SiO}_2(\text{mol}\%)$ 的掺 Er^{3+} 铋酸盐玻璃,采用高温熔融法制备。图 1 为实验测量到的该玻璃中 Er^{3+} 离子从可见到近红外区域(400~1 700 nm)的吸收光谱,光谱中每一个吸收峰均由 Er^{3+} 离子激发态能级标示,表示了 Er^{3+} 离子由基态 $^4\text{I}_{15/2}$ 到这些激发态能级间的吸收跃迁。

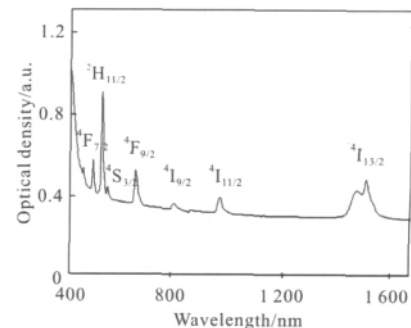


图 1 铋酸盐玻璃中 Er^{3+} 离子的吸收光谱

Fig.1 Absorption spectrum of Er^{3+} in bismuth-based glass

对于 $^4\text{I}_{13/2} \leftrightarrow ^4\text{I}_{15/2}$ 能级间 1.55 μm 波段的光信号吸收和受激辐射过程,可以由 Er^{3+} 离子吸收截面和受激发射截面大小来表征。根据 McCumber 理论, $^4\text{I}_{13/2} \leftrightarrow ^4\text{I}_{15/2}$ 能级间 Er^{3+} 离子的光信号受激发射截面可由公式(1)得到^[8]:

$$\sigma_e(\lambda) = \sigma_a(\lambda) \exp[(\epsilon - h\nu)/kT] \quad (1)$$

式中: k 为玻耳兹曼常数; T 为玻璃样品温度; ϵ 为与温度有关的激发能量,其物理意义是保持温度不变,

把一个 Er^{3+} 离子从基态 $^4I_{15/2}$ 激发到能级 $^4I_{13/2}$ 所需要的自由能; $\sigma_a(\lambda)$ 是吸收截面, 由实验测量到的 $^4I_{15/2} \leftrightarrow ^4I_{13/2}$ 能级间吸收确定为:

$$\sigma_a(\lambda) = \frac{2.303}{NL} OD(\lambda) \quad (2)$$

式中: $OD(\lambda)$ 为光密度; N 为 Er^{3+} 离子浓度; L 为玻璃样品厚度。计算得到的 Er^{3+} 离子吸收和受激发射截面如图 2 所示。可以看到, 铋酸盐玻璃中 Er^{3+} 离子存在着较大的受激发射截面, 峰值截面达到了 $8.6 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$ 。受激发射截面是表征玻璃基质能否产生激光的一个重要参数, 其值越大, 越容易产生激光。铋酸盐玻璃可以提供较大的受激发射截面是其具有较大折射率的缘故, 高折射率能够增强稀土离子格点处的局域晶体场, 从而导致较强的辐射跃迁。

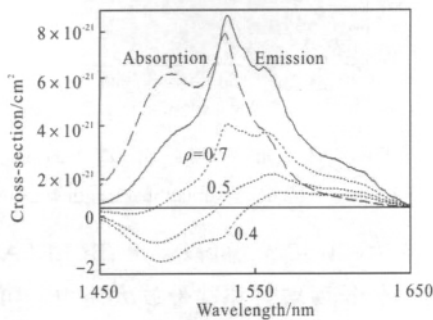


图 2 铋酸盐玻璃中 Er^{3+} 离子吸收、发射和增益截面谱

Fig.2 Absorption, emission and gain cross-section spectra of Er^{3+} in bismuth-based glass

由吸收截面和受激发射截面数据, 可以得到 Er^{3+} 离子在铋酸盐玻璃基质中的增益截面, 增益截面由下式给出:

$$g(\lambda) = \rho\sigma_e(\lambda) - (1-\rho)\sigma_a(\lambda) \quad (3)$$

式中: ρ 为粒子数反转比, 表示激发态 $^4I_{13/2}$ 能级上 Er^{3+} 离子数与掺杂总数之比。图 2 中虚线是在粒子数反转比分别为 0.7、0.5 和 0.4 情形下的增益截面谱, 增益截面谱揭示了在该掺 Er^{3+} 玻璃基质中可以获得增益的信号波长范围及其谱线类型。由图可见, 掺 Er^{3+} 铋酸盐玻璃具有潜在的宽带放大能力, 可以在 C+L 波段范围内提供信号增益, 但增益谱型并不平坦。在粒子数反转比较高的情况下, 有利于 C 波段信号获得高的增益。粒子数反转比下降时, 增益截面随之减小, 其分布趋向于 L 波段区域, 这时 L 波段信号将获得相对高的增益。

2 宽带增益平坦 Bi-EDFA 结构

设计的 Bi-EDFA 结构如图 3 所示。放大器结构采用两段铋基掺 Er^{3+} 光纤(Bi-EDF)级联的双通放大方式, 由两个光环行器(OC)、两个波分复用器(WDM)、两段 Bi-EDF 和一个商用宽带光纤布拉格光栅(FBG)连接而成。FBG 位于两段 Bi-EDF 之间, 其中心波长位于 1545 nm, 带宽为 40 nm 左右, 起到一个对 C 波段信号反射器的作用, 旨在将第一级输出波长小于 1565 nm 的 C 波段信号包括放大的自发辐射噪声(ASE)反射回到第一级进行双向传输, 而波长大于 1565 nm 的 L 波段信号则可继续进入到第二级中传输和放大, 并由光环行器(OC2)3、1 端口的相连构成了一个双通回路。对于第二级中反向传输的 C 波段 ASE 信号, FBG 具有同样的反射作用。这样, 对于输入的 C+L 波段宽带信号, 经过 FBG 的反射和分离, C 波段和 L 波段信号分别经历了不同长度即具有不同粒子数反转分布的增益介质, 各自将获得高增益的放大, 从而有望实现 Bi-EDFA 增益谱的宽带和平坦化。

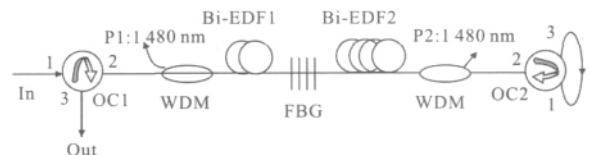


图 3 设计的宽带增益平坦 Bi-EDFA 的原理框图

Fig.3 Schematic diagram of the designed broad and gain-flattened Bi-EDFA

3 Bi-EDFA 理论模型

工作于 1.55 μm 波段的 EDFA 通常采用 1480 nm 波长进行泵浦。在该波长泵浦下, Er^{3+} 离子基态吸收截面较大, 泵浦效率较高, 放大器小信号增益较大。这时, Bi-EDFA 中光信号的放大过程可以用一个简单的均匀展宽三能级系统来处理^[9], 而其各能级上的粒子数分布 N_1 、 N_2 和 N_3 可以表示为^[10]:

$$\frac{\partial N_1(r, z)}{\partial t} = -(W_{12} + W_{ASE12} + R_{12})N_1 + (R_{21} + A_{21} + W_{ASE21} + W_{21})N_2 + C_{up}N_2^2$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_2(r,z)}{\partial t} &= (W_{12} + W_{ASE12} + R_{12})N_1 - (R_{21} + A_{21} + W_{ASE21} + \\ & W_{21})N_2 + W_{32}N_3 - 2C_{up}N_2^2 \\ \frac{\partial N_3(r,z)}{\partial t} &= -W_{32}N_3 + C_{up}N_2^2 \\ N_1(r,z) + N_2(r,z) + N_3(r,z) &= N_T(r,z) \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $R_{12, 21}$ 、 $W_{12, 21}$ 和 $W_{ASE12, ASE21}$ 分别表示泵浦波长、信号波长和 ASE 波长下的受激吸收和受激辐射几率; A_{21} 是能级 ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ 间自发辐射跃迁几率; W_{32} 是能级 ${}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ 间无辐射跃迁几率; C_{up} 是 Er^{3+} 离子能量上转移系数; N_T 表示 Er^{3+} 离子掺杂总浓度。

掺铒光纤中同时存在着信号光、泵浦光和 ASE 时, 它们在光纤中的传输行为可以描述为:

$$\begin{aligned} \frac{dP_{p\pm}(z, \lambda_p)}{dz} &= \pm 2\pi \int_0^{r_{Er}} \psi_p(r) [\sigma_e(\lambda_p)N_2 - \sigma_a(\lambda_p)N_1] r dr \cdot \\ & P_{p\pm}(z, \lambda_p) \mp \alpha_p P_{p\pm}(z, \lambda_p) \\ \frac{dP_{s\pm}^i(z, \lambda_s^i)}{dz} &= 2\pi \int_0^{r_{Er}} \psi_s(r) [\sigma_e(\lambda_s^i)N_2 - \sigma_a(\lambda_s^i)N_1] r dr \cdot \\ & P_s(z, \lambda_s^i) - \alpha_s P_s(z, \lambda_s^i) \\ \frac{dP_{ASE\pm}(z, \lambda_k^j)}{dz} &= \pm 2\pi \int_0^{r_{Er}} \psi_{ASE}(r) [\sigma_e(\lambda_k^j)N_2 - \sigma_a(\lambda_k^j)N_1] r dr \cdot \\ & P_{ASE\pm}(z, \lambda_k^j) \pm 2h\nu_k^j \delta\nu \cdot 2\pi \cdot \\ & \int_0^{r_{Er}} \psi_{ASE}(r) \sigma_e(\lambda_k^j) N_2 r dr \mp \alpha_{ASE} P_{ASE\pm}(z, \lambda_k^j) \end{aligned} \quad (5)$$

式中: P_p 为泵浦光功率; P_s^i 为第 i 路信号光功率; P_{ASE} 为 ASE 功率; $2h\nu_k^j \delta\nu$ 为等效输入噪声 (忽略 ASE 功率的精细谱分布); ψ 为模场分布; α 为光纤背景损耗; r_{Er} 为 Er^{3+} 离子掺杂半径; $\sigma_a(\lambda)$ 和 $\sigma_e(\lambda)$ 分别为 Er^{3+} 离子吸收和受激发射截面。

这样, 结合边界条件, 可以对方程组(4)~(5)进行数值迭代求解。

4 模拟结果

Bi-EDFA 采用双向对称泵浦方式, 泵浦波长为 1480 nm。输入信号为 56 路 C+L 波段宽带信号, 波长范围为 1520~1630 nm, 波长间隔 2 nm。选用的 Bi-EDF 工作参数为: 掺杂浓度为 $7.5 \times 10^{19} / \text{cm}^3$, 纤芯折射率为 2.039, 纤芯半径为 2.5 μm , 自发辐射跃迁几率 $A_{21} = 330 / \text{s}$ 。 Er^{3+} 离子吸收截面和受激发射截面

数据参见图 2。其他参数: 无辐射跃迁几率 $W_{32} = 7500 / \text{s}$, 能量上转移系数 $C_{up} = 8.5 \times 10^{-24} \text{ m}^3 / \text{s}$, 光纤背景损耗 $\alpha = 0.6 \text{ dB/m}$, 模场分布 ψ 选用第一类零级 Bessel 函数。模拟中, 忽略所有元件的插入损耗和熔接损耗。

保持第一级 Bi-EDF 长度 $L_1 = 50 \text{ cm}$ 不变, 控制第二级 Bi-EDF 长度分别为 $L_2 = 0, 50$ 和 200 cm , 首先对没有引入宽带光纤布拉格光栅 (FBG) 的双通结构 Bi-EDFA 的信号放大特性进行了模拟, 结果列于图 4 中。其中, 泵浦功率保持在 $P_1 = P_2 = 100 \text{ mW}$, 各路输入

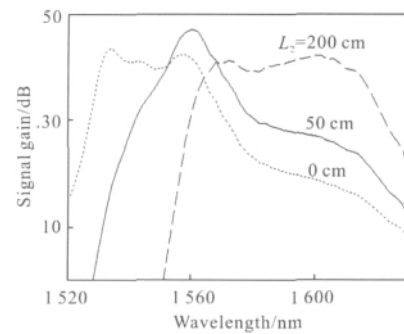


图 4 无 FBG 时不同光纤长度下 Bi-EDFA 的增益谱

Fig. 4 Bi-EDFA gain spectra under varied fiber length without FBG case

信号功率均为 -30 dBm 。可以看出, Bi-EDFA 具有潜在的极高单位长度增益和宽带放大能力, 可以在较短的 Bi-EDF 长度上同时实现多信号高增益放大。但 Bi-EDFA 对于 C+L 波段各信号的放大能力是有明显差异的, 且随光纤长度而变。当第二级光纤长度为 0 cm, 即 Bi-EDFA 完全由第一级 Bi-EDF 构成时, 能够实现高增益放大的信号波长主要分布在 C 波段区域, 增益高于 25 dB 的信号波长位于 1525~1576 nm 区间; 当第二级光纤长度增加至 50 cm 时, 增益高于 25 dB 的信号波长位于 1538~1608 nm 区间, 分布在 C+L 波段区域; 当第二级光纤长度进一步增加至 200 cm, 这时大部分 C 波段信号已无法实现放大, 而 L 波段信号增益迅速提高, 增益高于 25 dB 的信号波长范围移向 1568~1628 nm 区间, 主要分布在 L 波段区域。Bi-EDFA 的增益谱随光纤长度移向长波段, 主要在于第二级 Bi-EDF 激发态能级上粒子数反转比不断减小的结果, 这与前面增益截面谱的变化趋势相一致。因此, 在整个 C+L 波段的波长范围内, Bi-EDFA 的增益谱型是很不平坦的, 平坦部分仅仅局限在 C 波段 (光纤长度较短时) 或 L 波段 (光纤长度较长时) 区域。

图 5 是在第一级与第二级间引入 FBG 后 Bi-EDFA 的信号增益谱,其中第二级 Bi-EDF 长度分别为 $L_2=50$ 、100、170、200 cm,其他输入状态和工作参数保持不变。由图可见,在引入 FBG 后的 Bi-EDFA 结构中,当第二级 Bi-EDF 长度较短时,C 波段信号维持在一个相对较高的增益状态。随着第二级 Bi-EDF 长度的增加,C 波段信号增益缓慢减小,但这时 L 波段信号增益迅速提高。因此,Bi-EDFA 呈现出了有效放大带宽拓展和增益平坦化的特征。当第二级

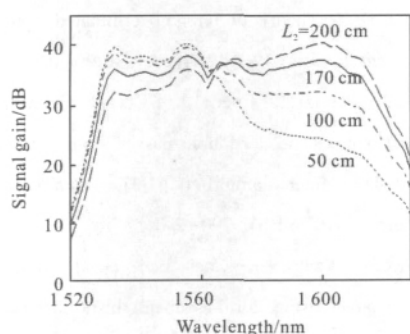


图 5 引入 FBG 后不同光纤长度下 Bi-EDFA 的增益谱
Fig.5 Bi-EDFA gain spectra under varied fiber length after the introduction of FBG

Bi-EDF 长度为 170 cm 时,增益高于 30 dB 的波长带宽达到了 90 nm 左右(1 530~1 620 nm),完全覆盖了 C+L 波段区域,而平均增益为 35.7 dB,增益起伏仅为 2.3 dB,在没有后接增益补偿滤波器的情形下实现了很好的增益平坦效果。这是由于 FBG 的反射和分离作用,对于输入的 C+L 波段宽带信号,其中 C 波段信号只经历了第一级 Bi-EDF 的双向传输,这一级光纤长度较短粒子数反转比较高,因此获得了高增益放大。而 L 波段信号则经历了第一级和第二级 Bi-EDF 的双向传输,由于第二级 Bi-EDF 长度较长,粒子数反转比相对较低,L 波段信号在此获得了高增益放大。C 波段信号增益随第二级 Bi-EDF 长度的增加而减小,主要在于高增益的 L 波段信号经反向传输再次进入到第一级时,消耗了第一级 Bi-EDF 中的部分激发态粒子数,粒子数反转比下降,处于短波长的 C 波段信号部分光子被吸收转化成为 L 波段长波长光子的结果。因此,选择合适的第一级和第二级 Bi-EDF 长度配比,可以同时实现 C 波段信号和 L 波段信号的高增益放大,从而实现 Bi-EDFA 增益谱的宽带和平坦化。显然,相对于通过组合 C 波段和 L

波段 Si-EDFA 构成的宽带放大器组,设计的 Bi-EDFA 具有结构简单、体积小、成本低且增益无“死区”的优点,这在日趋集成化的光纤通信系统中是非常理想的。

图 6 给出了引入 FBG 前后 Bi-EDFA 的噪声系数。由图可见,通过在第一级与第二级 Bi-EDF 间引入 C 波段宽带 FBG,阻止 C 波段信号进入到第二级 Bi-EDF 中继续传输,可以在整个 C+L 波段波长范围内使 Bi-EDFA 的噪声系数得到一定程度的降低。相对地,C 波段区域的噪声系数降低得较为显著,这主要是在引入 FBG 的 Bi-EDFA 结构中,C 波段信号具有高增益的结果。而 L 波段区域的噪声系数降低,在于 L 波段的放大自发辐射(ASE)噪声功率相对较小

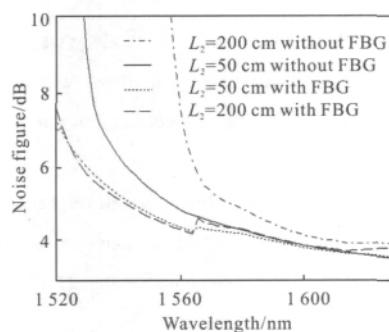


图 6 引入 FBG 前后 Bi-EDFA 的噪声系数
Fig.6 Noise figure of Bi-EDFA with and without FBG

的缘故。由前所述,FBG 的引入阻止了 C 波段信号进入到第二级 Bi-EDF 中,避免了其在较长 Bi-EDF 的传输过程中重被吸收,抑制了 L 波段 ASE 噪声功率的放大。

5 结 论

针对 C 波段信号和 L 波段信号在其放大过程中对粒子数反转比要求的不同,设计了一个两段 Bi-EDF 级联并在中间引入一个 C 波段宽带 FBG 的双通结构型 Bi-EDFA。研究表明,FBG 的引入可以使 C 波段信号和 L 波段信号分别经历不同 Bi-EDF 长度的双向传输,在各自获得高增益放大的同时,实现了 Bi-EDFA 增益谱的宽带和平坦化。同时,噪声系数也得到了相应的改善。研究结果对于研制具有宽带、增益平坦和低噪声系数的 Bi-EDFA 具有实际指导意义。

参考文献:

- [1] Yamada M, Ono H, Kanamori T, et al. Broadband and gain flattened amplifier composed of a 1.55 μm band and a 1.58 μm band Er-doped fiber amplifier in a parallel configuration [J]. *Electronics Letters*, 1997, 33 (8): 710–712.
- [2] Masuda H, Kawai S, Aida K. Ultra-wideband hybrid amplifier comprising distributed Raman amplifier and erbium-doped fiber amplifier [J]. *Electronics Letters*, 1998, 34(13): 1342–1343.
- [3] Shin J H, Lee J H. Investigation of signal excited-state absorption in bismuth-based erbium-doped fiber amplifier [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2010, 27 (7): 1452–1457.
- [4] Cheng X S, Parvizi R, Ahmad H, et al. Wide-band bismuth-based erbium-doped fiber amplifier with a flat-gain characteristics [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2009, 1 (5): 259–264.
- [5] Ni N, Chan C C, Tan K M, et al. Broad-band EDFA gain flattening by using an embedded long-period fiber grating filter [J]. *Optics Communications*, 2007, 271(2): 377–381.
- [6] Huang Yu, Dai Bizhi, Zhang Zaixuan, et al. Experimental study on gain flattening of wideband fiber Raman amplifier [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, 35 (3): 126–130. (in Chinese)
黄宇, 戴碧智, 张在宣, 等. 宽带光纤拉曼放大器的增益平坦化实验研究 [J]. 光电工程, 2008, 35(3): 126–130.
- [7] Chen H J, Yang X L. Gain flattened erbium-doped fiber amplifier using simple equalizing film [J]. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 1999, 20(12): 2107–2112.
- [8] McCumber D E. Theory of phonon-terminated optical masers [J]. *Physical Review*, 1964, 134(2A): A299–A306.
- [9] Harun S W, Parvizi R, Cheng X S, et al. Experimental and theoretical studies on a double-pass C-band bismuth-based erbium-doped fiber amplifier [J]. *Optics & Laser Technology*, 2010, 42(5): 790–793.
- [10] Zhou Yaxun, Wang Sen, Chen Fen, et al. Study of gain-clamped characteristics for broadband bismuth-based erbium-doped fiber amplifier [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(3): 520–524. (in Chinese)
周亚训, 王森, 陈芬, 等. 宽带铋基掺铒光纤放大器的增益箝制研究 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40(3): 520–524.

下期预览

半实物仿真中红外场景的模拟可信度评估

田晓飞, 马丽华, 赵尚弘, 董毅, 宋程远

(空军工程大学 电讯工程学院, 陕西 西安 710077)

摘要: 提出一种利用模拟目的校核和逼真度验证来评估半实物仿真中红外场景模拟可信度的方法。在探讨模拟目的、逼真度以及“相对等效”原理的基础上, 提出特殊的群运算, 有效进行了红外场景的模拟目的校核, 定性地反映了模拟红外场景达到半实物仿真任务对应模拟目的的能力。将正态分布的思想应用到由偏差度到逼真度的转化过程中, 设计算法分别实现了仿真起始点等效逼真度和仿真变化过程逼真度的验证。最后, 给出了模拟起始时刻逼真度和变化过程逼真度的权重比较方法, 进行了综合逼真度验证, 从而定量地评估了模拟红外场景再现实战红外场景的准确程度。