

双向掺铒光纤放大器的特性分析

毛庆和 王劲松 孙小菡 张明德
(东南大学电子工程系, 南京 210096)

摘 要 讨论了双向掺铒光纤放大器的结构方案, 利用考虑放大的自发辐射和背景损耗影响的双向掺铒光纤放大器稳态放大速率方程模型分析了增益与掺铒光纤长度、输入信号光功率、抽运光功率及抽运方式等参数之间的关系, 研究了单向和双向等功率抽运下正反向噪声系数随正反向信号光输入功率的变化行为。

关键词 掺铒光纤, 双向放大器, 增益, 噪声系数。

1 引 言

掺铒光纤放大器(简称 EDFA)是 1550 nm 光纤通信系统中的理想光放大器^[1], 但在常规掺铒光纤放大器中, 为消除端面和熔接点等各不连续点所造成的反射, 保证器件的行波放大, 通常在内部均设置了光隔离器, 这使得掺铒光纤放大器只具有单向放大功能。然而, 在利用光时域反射计进行系统监控以及在未来的光通信系统和网络中, 特别是用户环路系统、本地和广域网中, 不论是从降低成本还是从网络设计灵活性等方面考虑, 都要求掺铒光纤放大器具有双向放大的功能。

近年来, 已开始进行双向掺铒光纤放大器(Bi-EDFA)的研究, 并已有多种结构方案的实验研究报告^[2-4]。这些结构方案可分为两类, 一类是利用两根掺铒光纤(EDF)分别为正反向信号光提供增益; 另一类是采用一根掺铒光纤同时提供正反向增益。第一类结构方案有利于消除正反向信号光在放大过程中的交调, 但结构复杂、成本高, 且正反向信号光增益须通过分别调整其抽运光功率进行控制, 不利于系统应用; 而第二类方案则可大大简化器件结构, 由于采用同一根掺铒光纤作为放大媒质, 具有优良的正反向增益关系(将在下文中论及), 并且, 便于对抽运光功率的调整和正反向增益谱的均衡, 因而倍受人们的重视。

以单根掺铒光纤构成双向掺铒光纤放大器时, 须在结构上消除端面和熔接点等各不连续点的反射, 保证行波放大; 且双向放大时, 由于掺铒光纤中同时存在正反向输入信号光, 放大器的增益、噪声等工作参数与所用掺铒光纤长度、抽运功率和抽运方式等结构参数之间的关系将与单向放大时有所不同。本文将对这些问题进行研究, 在讨论单根掺铒光纤和光纤型环形器构成的双向掺铒光纤放大器结构方案基础上, 利用速率理论方程和数值模拟方法分析双向掺铒光纤放大器的增益和噪声特性。

2 结构方案与理论模型

在以单根掺铒光纤构成双向掺铒光纤放大器时, 由于允许光波沿两个方向传输, 而放大器内部各不连续点引起的反射将影响它的增益和噪声性能, 因而必须充分地抑制这种内部的反射源。光放大器的反射源主要来自于内部光器件端面的反射, 如波分复用耦合器和光纤熔接点等。但随着掺铒光纤与标准单模光纤(SMF)之间的熔接技术和波分复用器件水平的提高, 由它们引入的反射已可忽略, 因此用波分复用器件可直接构成无隔离器、单根掺铒光纤的双向掺铒光纤放大器(如文献[3]中的结构方案)。但这种方案中正反向信号光的传输路径相同, 不利于全光网络和系统对正反向信号光分别进行处理的要求; 而光环形器具有根据光波传输方向分离正反向信号光的功能, 且损耗和反射也已大大降低。如 Newport 公司的全光纤低损耗、偏振不敏感光环形器的插入损耗小于 0.6 dB、隔离度优于 60 dB。由于该量级隔离度所造成的反射对放大器的性能影响不大^[5], 因而可采用光环形器构成如图 1 所示的双向掺铒光纤放大器结构方案。在这种结构方案中, 相向传输的信号光在同一根掺铒光纤中放大, 而在该光纤的两端由光环形器分成两条支路, 然后再由光环形器合波耦合至传输光纤。在正反向信号光的输出支路上可设置放大的自发辐射光滤波器和可变光衰减器以抑制放大的自发辐射光和调整正反向的增益, 也可以插入其它用途的光功能器件, 如监控、增益谱均衡器等。

当图 1 所示的双向掺铒光纤放大器级联运用于光通信系统时, 系统中其它光器件形成的反射、传输光纤的瑞利散射以及级联放大时放大的自发辐射的积累等因素也将影响放大器性能。但是, 由于: 1) 网络系统终端具有自动隔离正反向信号光的功能; 2) 采用折射率匹配、防反膜等措施可降低系统中其它光器件的反射; 3) 传输光纤自身的损耗也将抑制这些不利影响。因而图 1 所示的双向掺铒光纤放大器依然能保持较好的性能^[6]。

为研究由单根掺铒光纤构成的双向掺

铒光纤放大器的基本放大特性, 本文仅考虑各种内部反射均可忽略的简单情况。假定掺铒光纤为均匀加宽介质, 利用掺铒光纤放大器速率方程理论^[7], 可以得到描述双向掺铒光纤放大器多信道稳态放大时的微分方程组

$$\frac{dP_{sk}^{\pm}(z)}{dz} = \pm \Gamma_s \{ [\sigma_e(\lambda_{sk}) + \sigma_a(\lambda_{sk})] N_2(z) - \sigma_a(\lambda_{sk}) N_0 \} P_{sk}^{\pm}(z) \mp \alpha_s P_{sk}^{\pm}(z) \quad (1)$$

$$\frac{dP_p^{\pm}(z)}{dz} = \pm \Gamma_p \{ [\sigma_e(\lambda_p) + \sigma_a(\lambda_p)] N_2(z) - \sigma_a(\lambda_p) N_0 \} P_p^{\pm}(z) \mp \alpha_p P_p^{\pm}(z) \quad (2)$$

$$\frac{dP_{ase,j}^{\pm}(z)}{dz} = \pm \Gamma_s \{ [\sigma_e(\lambda_{ase,j}) + \sigma_a(\lambda_{ase,j})] N_2(z) - \sigma_a(\lambda_{ase,j}) N_0 \} P_{ase,j}^{\pm}(z) \pm 2\Gamma_s \sigma_e(\lambda_{ase,j}) N_2(z) h\nu_{ase,j} \Delta\nu_j \mp \alpha_s P_{ase,j}^{\pm}(z) \quad (3)$$

式中, $P_p^{\pm}(z)$ 、 $P_{sk}^{\pm}(z)$ 分别为正反向传输的抽运光和正反向传输的第 k 个信道信号光在 z 处的光功率, $P_{ase,j}^{\pm}(z)$ 分别为正反向传输的第 j 个频率间隔为 $(\nu_{ase,j}, \nu_{ase,j} + \Delta\nu_j)$ 内的放大的自发

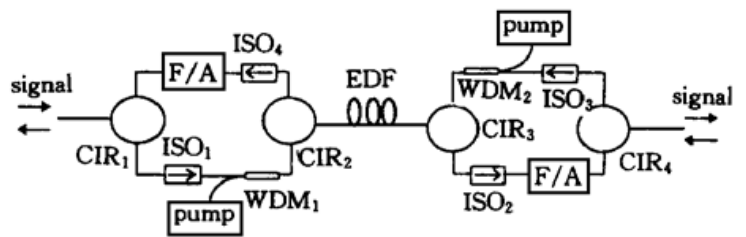


Fig. 1 The configuration of the Bi-EDFA based on optical circulators. ISO: isolator, CIR: circulator, F/A: filter and attenuator, WDM: wavelength division multiplexing coupler

辐射光在 z 处的功率, $\sigma_a(\lambda_i)$ 、 $\sigma_e(\lambda_i)$ 分别为光波长 λ_i 处的受激吸收和受激发射截面, h 为普朗克(Planck) 常数, Γ_s 、 Γ_p 分别为信号光和抽运光模场分布函数与掺铒光纤中铒离子分布函数之间的重叠积分因子, α_s 、 α_p 分别为信号光和抽运光的背景损耗系数, N_0 为掺铒离子浓度, $N_2(z)$ 为稳态条件下 z 处的上能级粒子数, 满足

$$N_2(z) = \left\{ \sum_j \frac{\Gamma_s \sigma_a(\lambda_{ase, j}) [P_{ase, j}^+(z) + P_{ase, j}^-(z)]}{A h \nu_{ase, j}} + \sum_i \frac{\Gamma_s \sigma_a(\lambda_{sk}) [P_{sk}^+(z) + P_{sk}^-(z)]}{A h \nu_{sk}} + \frac{\Gamma_p \sigma_a(\lambda_p) (P_p^+(z) + P_p^-(z))}{A h \nu_p} \right\} \left\| \left[A_{21} + \sum_j \frac{\Gamma_s [\sigma_a(\lambda_{ase, j}) + \sigma_e(\lambda_{ase, j})] [P_{ase, j}^+(z) + P_{ase, j}^-(z)]}{A h \nu_{ase, j}} + \sum_i \frac{\Gamma_s [\sigma_a(\lambda_{sk}) + \sigma_e(\lambda_{sk})] [P_{sk}^+(z) + P_{sk}^-(z)]}{A h \nu_{sk}} + \frac{\Gamma_p [\sigma_a(\lambda_p) + \sigma_e(\lambda_p)] [P_p^+(z) + P_p^-(z)]}{A h \nu_p} \right] \right\} \quad (4)$$

式中 A 为掺铒光纤的有效掺杂截面的面积, A_{21} 为自发辐射速率。

(1) 式、(2) 式和(3) 式考虑了放大的自发辐射谱分布和背景损耗的影响, 分别描述了正反向信号光、抽运光和放大的自发辐射光在双向掺铒光纤放大器中的传输放大行为, 适用于 980 nm 和 1480 nm 抽运下无激发态吸收的情况。利用这组相互耦合的微分方程组, 在给定输入条件下, 通过数值分析, 可以对双向掺铒光纤放大器的增益、噪声和输出功率特性进行研究。为了精确地反映放大的自发辐射谱的影响, 特将正反向放大的自发辐射光从 1505 nm 到 1575 nm 分隔成 70 个相等的区间, 数值计算时, 铒离子受激吸收和受激辐射截面谱采用文献 [8] 给出的值, 其它参数如表 1 中所示。

Table 1. The Bi-EDFA parameters used in calculation

the area of efficient Er-doping cross section	$15.8 \times 10^{-12} \text{ m}^2$
Er-doping density	$8.0 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$
the lifetime of high level	11 ms
Γ_s 、 Γ_p	0.4
α_s 、 α_p	0.2 dB/km、0.25 dB/km
pump wavelength	1480 nm

3 数值结果与讨论

图 2 给出了双向等功率抽运、抽运光总功率为 60 mW 时, 在不同输入信号光功率下增益

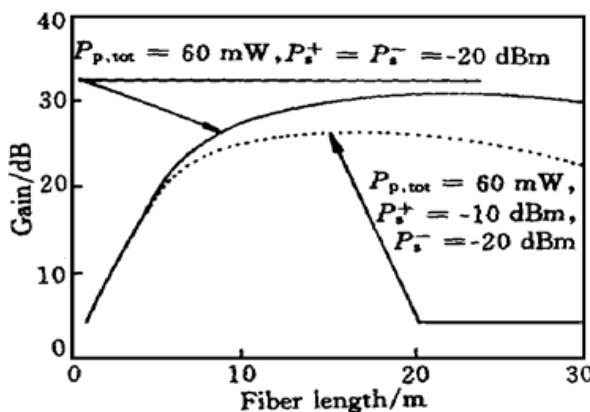


Fig. 2 Forward and backward gain versus erbium-doped fiber length for different input signal power with bi-directional pumping. The signal wavelength is 1552 nm

与掺铒光纤长度之间的关系。可见, 对于给定的输入信号光功率, 存在一个最佳的增益长度, 在该长度处的本地增益为零, 总增益最大; 并且, 信号光输入功率越大, 最佳增益长度越短, 所能获得的最大增益越小。这与常规掺铒光纤放大器特性相同。但是, 在一定的抽运光功率下, 不论正反向输入信号光的大小相等与否, 正反向信号的增益均相等。增益的大小以及最佳增益长度仅与总输入信号功率有关, 即只要总输入功率相等, 正、反向最大增益和最佳增益长度相同。这可根据(1) 式进一步解释: 当正反向信号光的波长相同时, 相应的受激辐射和吸收截面值相等, 正反向信号光在掺铒光纤中的任一

点所获得的增益只与截面值的大小有关, 因而正反向信号光在整段掺铒光纤上获得的增益相等。

图 3 给出了在不同掺铒光纤长度、不同抽运方式和不同输入信号光功率下增益与总抽运光功率之间的关系。由图 3 可见, 对于不同的输入信号光功率, 在相同抽运方式和相同掺铒光纤长度下阈值抽运光功率相同。当抽运光功率超过阈值后, 增益值随抽运光功率的增加迅速增大, 但增大的速度和增益的大小与抽运方式有关。单向抽运时增益及其增大的速度大于双向抽运时的增益和增大的速度。这是由于单向抽运时, 抽运光在其输入端附近产生比双向抽运时更高的粒子数反转度, 从而提供较大的增益; 但随着抽运光功率的不断提高, 增益均开始饱和, 且深度饱和时单向和双向抽运的增益渐渐趋于一致。但在不同的输入信号光功率下, 饱和增益的大小不同, 输入功率越大, 饱和增益越低。此外, 不同长度掺铒光纤的阈值抽运功率不同, 较长掺铒光纤对应于较高的阈值功率, 这也与常规掺铒光纤放大器的特性相同。

必须指出, 正反向信号光的增益只有在光波长相同时才相等。当正反向信号光的波长不同时, 双向掺铒光纤放大器增益不再相等, 而是与常规掺铒光纤放大器多波长放大时的行为相似。图 3 中的插图给出了正反向信号光波长分别为 1552 nm 和 1550 nm 时的正反向增益, 其增益差约 0.1 dB。

图 4 所示为掺铒光纤长度为 15 m、70 mW 抽运光功率下, 正向抽运双向掺铒光纤放大器的正反向增益与正反向输入信号光功率之间的关系。由图 4 可见, 当正反向输入信号光功率较小时, 为小信号增益, 放大器处于线性放大区, 增益曲面较平坦。但不论是正向还是反向信号光输入功率的增加, 都将使放大器进入饱和区, 正反向增益均降低; 并且, 增益随正反向信号光输入功率增加而降低的速度相同, 表现为如图所示的对称曲面, 即增益值仅与正反向输入信号光总功率有关。当输入信号光总功率超过 -13 dBm 时, 双向掺铒光纤放大器达到深度饱和, 增益值随信号光输入功率的增加迅速降低, 总输出功率也趋于最大输出功率。图 5 给出了在图 4 条件下, 正向输入信号光功率为 -20 dBm 时, 正反向信号光输出功率随反向信号光输入功率变化的关系。从图 5 中可以看出, 由抽运光转换的正反向信号光输出功率由它们的总输入功率及其相对大小决定: 当正反向信号光输入功率相等时, 其输出功率也相等; 而当正(反)向信号光输入功率远大于反(正)向信

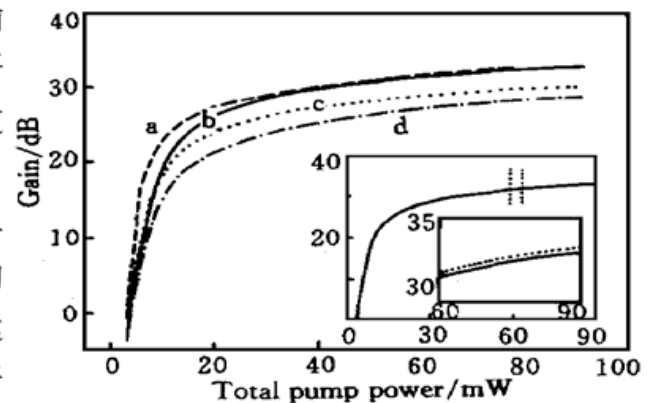


Fig. 3 Gain versus total input pump power for different EDF length, pump style and input signal power. the signal wavelength is 1552 nm. a: forward pumped, EDF length is 15 m, both forward and backward input signal power are -20 dBm. b: bi-directional equal power pumped, EDF length is 15 m, both forward and backward input signal power are -20 dBm. c: bi-directional equal power pumped, EDF length is 15 m, both forward and backward input signal power are -13 dBm. d: bi-directional equal power pumped, EDF length is 10 m, both forward and backward input signal power are -20 dBm. An insert diagram indicates the forward and backward gain at the forward and backward wavelength of 1552 nm (dot line) and 1550 nm (thin line) under the condition of c, respectively

号光输入功率时, 抽运光主要转换为正(反)向信号光输出, 但正反向增益始终相等。

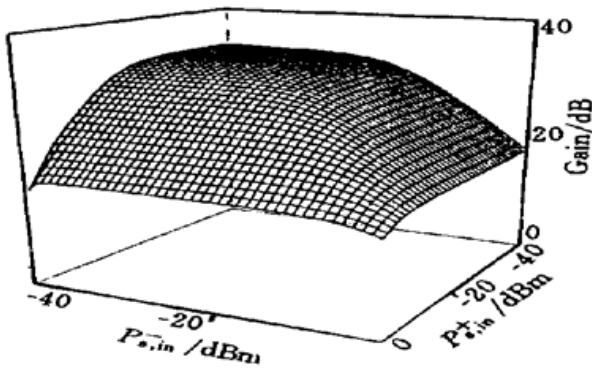


Fig. 4 Forward (backward) gain versus different forward (backward) and backward (forward) input signal power. Forward pumped, pump power is 70 mW, EDF length is 15 m, the signal wavelength is 1552 nm

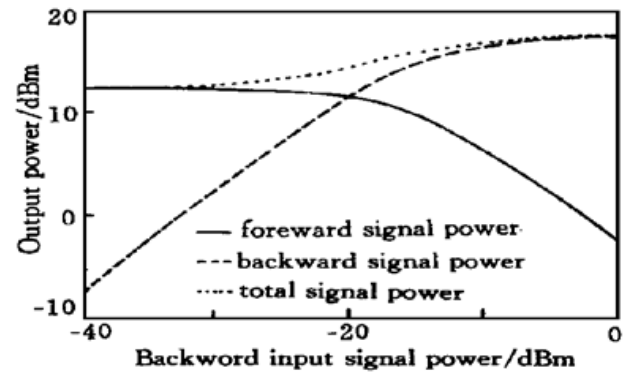


Fig. 5 Output signal power versus backward input signal power. Forward pumped, pump power is 70 mW, EDF length is 15 m, the signal wavelength is 1552 nm

图 6 为不同抽运方式下噪声系数与正反向信号光输入功率之间的关系曲面, 噪声系数由下式定义^[9]

$$F_N^\pm = 10 \log \left[\frac{1}{G} \left(\frac{P_{ase}^\pm}{h\nu_s \Delta\nu_0} + 1 \right) \right] \quad (5)$$

式中 P_{ase}^\pm 分别为在信号光频率 ν_s 附近所设置的带宽为 $\Delta\nu_0$ 光滤波器内的正反向放大的自发辐射功率。这里仅考虑信号光散弹噪声和信号光与放大的自发辐射光之间的差拍噪声。图 6 总的变化趋势是, 当正反向信号光输入功率均较小时, F_N^\pm 较大, 这是由于这时正反向放大的自发辐射功率谱密度较大, 信号光与放大的自发辐射光之间的差拍噪声较大, 从而 F_N^\pm 较大; 随着正(反)向信号光输入功率的增加(放大器依然近似处于线性放大区, 增益较高), 正(反)向放大的自发辐射光受到正(反)向信号光的抑制而逐渐减小, 这使得信号光与放大的自发辐射光之间的差拍噪声逐渐降低, 从而正(反)噪声系数逐渐减小至最小值。这时, 若进一步增大正(反)向信号光输入功率, 因放大器深度饱和增益下降, 正(反)噪声系数将急骤恶化; 在反(正)向信号光输入功率较大导致放大器饱和工作时, 不论正(反)向信号光输入功率大小如何, 正(反)向噪声系数均较大。

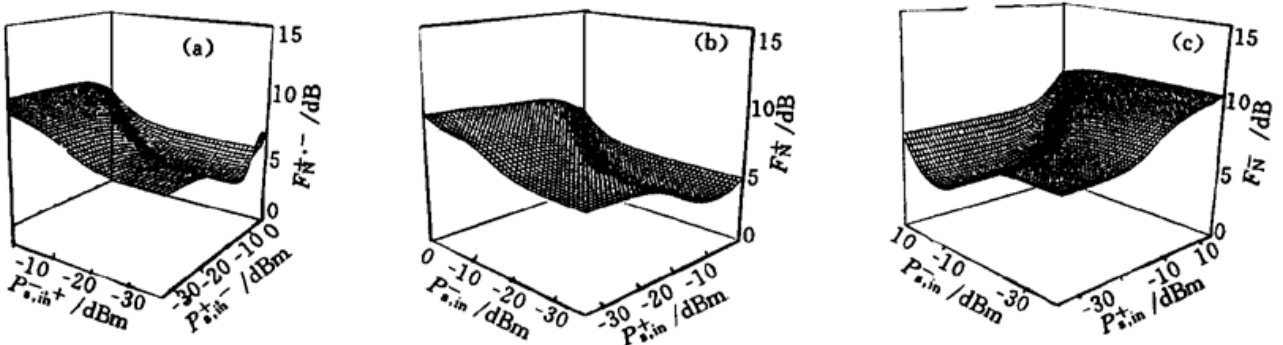


Fig. 6 Noise figure versus different forward (backward) and backward (forward) input signal power for the signal wavelength of 1552 nm with EDF length of 15 m and total pump power of 70 mW. (a) The forward and backward noise figure with bi-directional equal power pumping; (b) The forward noise figure with forward pumping; (c) The backward noise figure with forward pumping

光纤放大器是一种相互作用距离长的光放大器, 其放大过程是沿着整个掺铒光纤连续不断进行的。因此, 正反向信号光、抽运光沿掺铒光纤长度方向上的分布及其所决定的上能级粒子数沿掺铒光纤的分布对双向掺铒光纤放大器的噪声特性有着决定性的影响。也就是说, 抽运方式、正反向信号光输入总功率及其相对大小对双向掺铒光纤放大器噪声性能有影响。双向等功率抽运下, 正向噪声系数随正反向信号光输入功率变化的曲面与反向噪声系数随反正向信号光输入功率变化的曲面重合, 如图 6(a) 所示。但是, 正(反)向噪声系数不仅取决于正(反)向信号光输入功率, 还取决于反(正)向输入信号光功率的大小; 而在单向抽运时, 正反向噪声系数的曲面将不再对称重合。图 6(b)、图 6(c) 分别为正向抽运时的正反向噪声曲面。可见, 尽管正向噪声系数随正反向信号光输入功率变化的曲面与反向噪声系数随反正向信号光输入功率变化的曲面相似, 但放大器在正反向信号光输入功率分别等于反正向信号光输入功率时的正向和反向噪声系数不再相等, 正向噪声系数优于反向噪声系数。这是因为正向抽运时, 抽运光在掺铒光纤的正向输入端附近产生更高的粒子数反转, 因而在正向输入端附近本地增益大。虽然根据(3)式中第一项可知, 正反向放大的自发辐射在掺铒光纤中任一处所获得的增益依然相同, 但由(3)式中第二项可知, 在掺铒光纤中任一处都将产生新的放大的自发辐射。这样, 正向抽运时的反向放大的自发辐射光传输放大到掺铒光纤的正向输入端附近时, 高增益大信号放大使得其输出功率大于正向放大的自发辐射(高增益小信号放大)输出功率, 从而使反向噪声系数恶化。为了更清晰地说明噪声系数与抽运方式、正反向信号光输入功率之间的关系, 图 7 给出了不同抽运方式、不同信号光输入功率下的输出谱。从图 7 可见, 当正反向信号光输入功率相等时, 在双向等功率抽运情况下, 正反向输出谱相同; 而在正向抽运时, 反向放大的自发辐射功率谱密度大于正向放大的自发辐射功率谱密度。

综上所述, 双向掺铒光纤放大器的阈值特性、增益与抽运光功率间的关系以及抽运方式对双向掺铒光纤放大器噪声性能的影响与常规掺铒光纤放大器基本相同, 但是, 双向掺铒光纤放大器最佳增益长度、增益的大小以及正反向饱和特性将取决于输入信号光的总功率, 而正反向噪声系数不仅依赖于输入信号光总功率, 而且还与它们的相对大小有关。

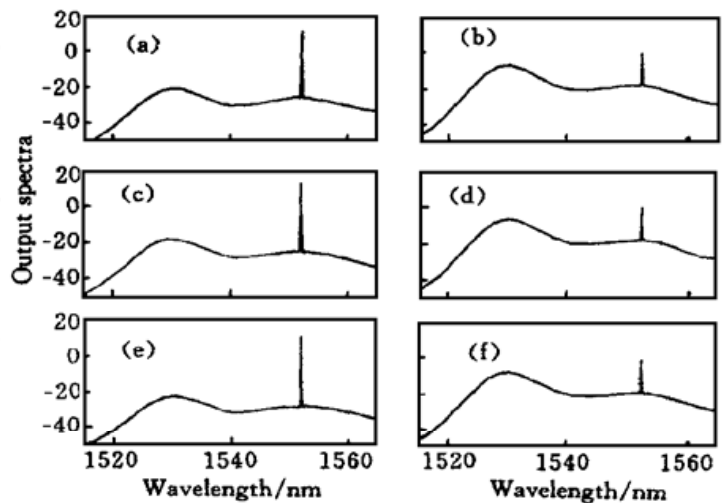


Fig. 7 Output spectra around 1550 nm calculated from the theory for the signal wavelength of 1552 nm with EDF length of 15 m and total pump power of 70 mW. Resolution is 0.1 nm and the signal spectrum width is assumed 0.2 nm. (a) and (b): Bi-directional equal power pumped, the forward and backward input signal power are -30 dBm and -10 dBm, respectively. (c) and (d): Spectra in the backward direction with forward pumped at both forward and backward input signal power are -30 dBm and -10 dBm, respectively. (e) and (f): Spectra in the forward direction with forward pumped with forward and backward input signal power of -30 dBm and -10 dBm, respectively

综上所述, 双向掺铒光纤放大器的阈值特性、增益与抽运光功率间的关系以及抽运方式对双向掺铒光纤放大器噪声性能的影响与常规掺铒光纤放大器基本相同, 但是, 双向掺铒光纤放大器最佳增益长度、增益的大小以及正反向饱和特性将取决于输入信号光的总功率, 而正反向噪声系数不仅依赖于输入信号光总功率, 而且还与它们的相对大小有关。

结 论 本文讨论了双向掺铒光纤放大器的结构方案, 利用考虑放大的自发辐射谱和背景损耗影响的双向掺铒光纤放大器稳态放大速率方程模型, 对增益、噪声特性进行了数值分析。

结果表明,在不同输入信号光功率及一定抽运方式和掺铒光纤长度下,阈值抽运光功率相同;对于同波长的正反向信号光,在给定的抽运光功率下,正反向增益相等。它由输入信号光总功率决定,与其相对大小无关。但增益与抽运方式有关,单向泵浦的增益略大于双向抽运的增益;在一定的正反向信号光输入功率下,存在一个最佳的增益长度。最佳增益长度仅取决于正反向输入信号光总功率。双向等功率抽运时,正反向噪声特性相同;而单向抽运的正反向噪声系数由正反向输入信号光功率相对大小及其总功率决定;正向抽运时的正向噪声系数优于反向噪声系数。以上结果可作为实际光通信系统中双向掺铒光纤放大器优化设计的依据。

参 考 文 献

- [1] Olsson A. Lightwave systems with optical amplifiers. *J. Lightwave Technol.*, 1989, 7(10) : 1071~1081
- [2] Haugen, Freeman J, Conradi J. Bidirectional transmission at 622 Mb/s utilizing erbium-doped fiber amplifiers. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1992, 4(8) : 913~ 916
- [3] Orazi J, McLandrich M N. Bidirectional transmission at 1.55 micros using fused fiber narrow channel wavelength division multiplexers and erbium doped fiber amplifier repeater. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, 6(4) : 571~ 574
- [4] van Deventer M O, Koning O J. Bidirectional transmission using an erbium-doped fiber amplifier without optical isolators. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1995, 7(11) : 1372~ 1375
- [5] Yamashita, Okoshi T. Performance degradation of erbium doped fiber amplifier induced by terminal reflection. *Electron. Lett.*, 1992, 28(14) : 1323~ 1324
- [6] Delisle, Conradi J. Model for bidirectional transmission in an open cascade of optical amplifiers. *J. Lightwave Technol.*, 1997, 15(5) : 749~ 757
- [7] Giles, Desurvire E. Modeling erbium-doped fiber amplifier. *J. Lightwave Technol.*, 1991, 9(2) : 271 ~ 283
- [8] Desurvire E, Simpson J R. Amplification of spontaneous emission in erbium-doped fibers. *J. Lightwave Technol.*, 1989, 7(5) : 835~ 845
- [9] Bertilsson K, Andrekson P A. Modeling of noise in erbium-doped fiber amplifiers in the saturated regime. *J. Lightwave Technol.*, 1994, 12(7) : 1198~ 1206

Analysis of Amplification Characteristics of Bidirectional EDFAs

Mao Qinghe Wang Jingsong Sun Xiaohan Zhang Mingde
 (Department of Electronic Engineering, Southeast University, Nanjing 210096)
 (Received 31 January 1998; revised 27 January 1999)

Abstract The rate equation model is setup for the signal gain, pump absorption and output noise spectrum of bidirectional erbium-doped fiber amplifier (Bi-EDFA) including numbers of signals, pumps of arbitrary direction, amplified spontaneous emission(ASE) and inherent loss. The influences of erbium-doped fiber length, input signal power, pump style and pump power on the gain characteristics of Bi-EDFA are analyzed. Forward- and backward- noise figure for different pump style versus bidirectional input signal power is investigated. With these results, the optimal design for Bi-EDFAs in optical communication systems and networks can be performed.

Key words erbium-doped fiber, bidirectional amplifier, gain, noise figure.