

分布式 EDFA 中受激布里渊散射效应的研究*

李 宏** 杨祥林

(东南大学电子工程系 南京 210096)

提要 利用含有受激布里渊散射效应(SBS)的传输方程,研究了透明传输和最佳掺杂浓度下,受激布里渊散射效应对分布式掺铒光纤放大器(d-EDFA)的各种特性的影响。结果表明:受激布里渊散射消耗了 d-EDFA 的泵功率,恶化了系统的噪声特性,使传输系统的最佳泵浦周期减小,所需的总泵浦功率增大。

关键词 分布式 EDFA,受激布里渊散射效应(SBS),噪声,最佳泵浦周期

1 引 言

全光通信是近年来光纤通信研究的焦点,特别是掺铒光纤放大器的研制成功,实现了长距离孤子传输,使全光通信走向实用化^[1]。

有两种孤子长距离传输技术:一种是集总式放大技术,在孤子全光通信中,由于信号功率的偏差引起的信噪比的恶化,其泵间距离限制在 30 km;另一种是分布式放大技术,它可以沿着传输线补偿光纤损耗,也不存在信号功率的偏差引起的信噪比的恶化,其泵间距离已达 100 km 以上^[2,3]。

分布式掺铒光纤放大器(d-EDFA)中受激布里渊散射(SBS)效应是由于 EDFA 两端的泵浦引起的^[4]。它对 EDFA 的各种特性有着明显的影响,如消耗了泵浦功率等。本文利用含有受激布里渊散射效应的传输方程,研究了透明传输和最佳掺杂浓度下,受激布里渊散射效应对分布式掺铒光纤放大器(d-EDFA)的临界泵浦功率、噪声指数、信噪比以及 500 km 长的传输系统的泵浦周期、总泵浦功率的影响。

2 理论模型

一般 d-EDFA 采用低损耗波长下的双向泵浦,当采用波长 $\lambda_p = 1.48 \mu\text{m}$ 的激光器作为泵浦光时,放大器可当作两能级来处理。稳态情况下,放大器中处于上能级的铒离子浓度 $n_2(z)$ 与总掺杂铒离子浓度 $n_i(z)$ 的关系为^[4~6]

$$n_2(z) = \frac{(p_p^+ + p_p^-)/p_p^{th} + (p_s + p_a^+ + p_a^-)/p_s^{th} + (p_b^+ + p_b^-)/p_b^{th}}{1 + (p_p^- + p_p^+)/p_p^{is} + (p_s + p_a^+ + p_a^-)/p_s^{is} + (p_b^+ + p_b^-)/p_b^{is}} n_i(z) \quad (1)$$

* 国家自然科学基金资助项目。

** 联系单位:湖北师范学院物理系。

收稿日期:1996-04-01;收到修改稿日期:1996-05-30

含有受激布里渊散射效应的信号、前后向泵浦、前后向 ASE 功率以及前后向受激布里渊散射功率 $p_s, p_p^\pm, p_a^\pm, p_b^\pm$ 的传输演化方程分别为

$$\begin{aligned} dp_s(z)/dz &= p_s \Gamma_s (\sigma_{se} n_2 - \sigma_{sa} n_1) - \alpha_p p_s \\ dp_p^\pm(z)/dz &= \mp p_p^\pm \Gamma_p (\sigma_{pa} n_1 - \sigma_{pe} n_2) \mp \alpha_p p_p^\pm \mp g_b (p_b^\pm + p_{b0}^\pm) p_p^\pm / A \\ dp_a^\pm(z)/dz &= \pm p_a^\pm \Gamma_s (\sigma_{se} n_2 - \sigma_{sa} n_1) \pm 2\sigma_{se} \Gamma_s n_2 h \nu_s \Delta \nu \mp \alpha_p p_a^\pm \\ dp_b^\pm(z)/dz &= \pm p_b^\pm \Gamma_b (\sigma_{be} n_2 - \sigma_{ba} n_1) \mp \alpha_p p_p^\pm \pm g_b (p_b^\pm + p_{b0}^\pm) p_p^\pm / A \end{aligned} \quad (2)$$

其中 z 为沿传输方向的坐标; “ \mp , $-$ ” 分别表示 $-z$ 与 $+z$ 方向; $k = s, p, a, b$; A 为光纤有效截面面积; $\Gamma_k = 1 - \exp(-A_e/A)$ 为信号、泵浦或受激布里渊散射场与光纤掺杂的重合系数, A_e 为有效掺杂面积; σ_{ka} (σ_{ke}) 为信号、泵浦或受激布里渊散射的吸收(辐射)截面面积; ν_k 为频率; τ 为上能级平均寿命; n_1 为处于基态的铒离子的浓度, $n_t = n_1 + n_2$; $\Delta \nu$ 为噪声等效带宽; α_k 为光纤的本征损耗; h 为普朗克常数; $g_b = g_0 \Delta \nu_b / (\Delta \nu_b + \Delta \nu_p)$; g_0 为受激布里渊散射增益常数; $\Delta \nu_b, \Delta \nu_p$ 分别为受激布里渊散射增益带宽和泵浦激光线宽; p_{b0}^\pm 为前后向自发受激布里渊散射功率; $p_k^{\text{th}} = A h \nu_k / \sigma_{ka} \Gamma_k \tau$, $p_k^{\text{is}} = A h \nu_k / (\sigma_{ka} + \sigma_{ke}) \Gamma_k \tau$ 。

由(2)式可求得放大器的噪声指数 NF , 其值取决于 d-EDFA 输出端的前向 ASE 的功率 $p_a^+(L)$, 放大器的噪声等效带宽 $\Delta \nu$ 和放大器的增益 G :

$$NF = \frac{p_a^+(L)/h\nu_s\Delta\nu + 1}{G} \quad (3)$$

其中 L 为 d-EDFA 的长度。

设滤波器的中心波长 $\lambda_f = \lambda_s$, 则 d-EDFA 的信噪比表示为

$$SNR = \frac{\Delta\lambda_p p_s(L)}{\Delta\lambda_f p_a^+(L)} \quad (4)$$

其中, $\Delta\lambda_f$ 为滤波器带宽, $\Delta\lambda_s = \lambda_s^2 \Delta \nu / c$ 。

光纤通信系统中采用光纤放大器的目的是为了补偿光纤损耗, 实现透明传输, 而采用 d-EDFA, 则是为了光信号长距离稳定透明传输, 因此本文研究是在透明传输放大条件 ($G = 1$) 下进行的。对于给定长度的 d-EDFA, 在透明传输下, 存在着一个最佳掺杂浓度, 使得 d-EDFA 两端泵浦的功率最小, 并定义

$$p_p = p_p^+(0) = p_p^-(L) \quad (5)$$

为透明传输和最佳掺杂浓度下的临界泵浦功率。

放大传输系统需要周期地使用一定长度的 d-EDFA 来传输, 所需的总泵浦功率与每个 d-EDFA 的临界泵浦功率的关系为

$$p_{pt} = \frac{L_0 p_p}{L} \quad (6)$$

式中 L_0 为系统长度, p_{pt} 存在一个最小值, 与之对应的 $L = L_p$ 称为最佳泵浦周期, 即用 L_p 长的 EDFA 级联构成 L_0 长的传输系统, 所需的总泵浦功率最小。

下面, 利用(1)~(6)将在透明传输和最佳掺杂浓度下, 分析含有受激布里渊散射效应的 d-EDFA 的噪声指数、信噪比、临界泵浦功率以及 500 km 长距离的传输系统的最佳泵浦周期, 计算中所用的光纤及系统参数为^[4-6] $\lambda_p = 1480$ nm, $\lambda_s = 1545$ nm, $\sigma_{pe} = \sigma_{be} = 0.42 \times 10^{-21}$ cm², $\sigma_{pa} = \sigma_{ba} = 1.86 \times 10^{-21}$ cm², $\alpha_k = 5.76 \times 10^{-5}$ /m, $\sigma_{se} = 5.03 \times 10^{-21}$ cm², $\sigma_{sa} = 2.85 \times 10^{-21}$ cm², $\Delta \nu = 3100$ GHz, $\Delta \nu_b = 15$ MHz, $p_{b0}^\pm = 0.5$ nW, $\Delta \nu_p = 175$ MHz, $A = 35$ μm^2 , $A_e = 3.14$ μm^2 , $\tau = 100$ s⁻¹, $g_0 = 2.2 \times 10^{-11}$ m/W, $\Delta\lambda_f = 0.2$ nm。

3 结果分析

以下是运用四阶龙格库塔法, 对方程(2)所做的数值结果分析。

3.1 临界泵浦功率

图 1 是透明传输和最佳掺杂浓度下, 不同长度的 d-EDFA, 不考虑和考虑受激布里渊散射效应时, 所需的临界泵浦功率。受激布里渊散射效应明显增大了 d-EDFA 的临界泵浦功率, 随着 d-EDFA 长度增大, 受激布里渊散射效应的影响越明显, $L = 100$ km 时, 不考虑受激布里渊散射效应, d-EDFA 两端的临界泵浦功率分别为 110 mW, 考虑受激布里渊散射效应, 则两端的泵浦功率增大到 147 mW, 受激布里渊散射消耗了泵浦功率。

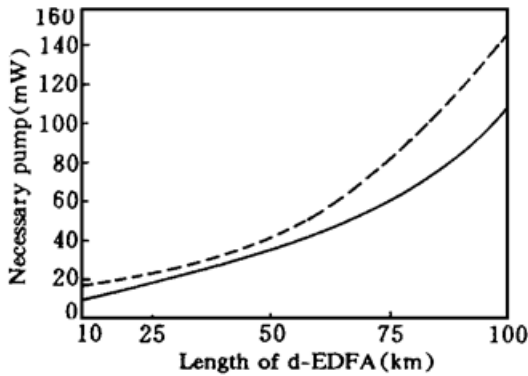


图 1 透明传输和最佳掺杂浓度下, 不同长度 d-EDFA 所需临界泵浦功率。输入 $p_s = 100 \mu\text{W}$, 实线: 不含 SBS; 点线: 含 SBS

Fig. 1 Under optimal doping concentration and transparent transmission, the necessary pump power versus the length of the d-EDFA. Input $p_s = 100 \mu\text{W}$. solid line: excluding SBS; dotted line: including SBS

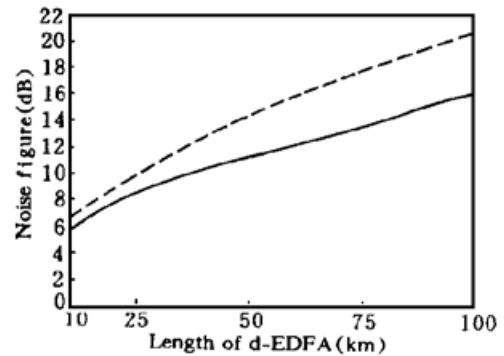


图 2 透明传输和最佳掺杂浓度下, 不同长度 d-EDFA 的噪声指数。输入 $p_s = 100 \mu\text{W}$, 实线: 不含 SBS; 点线: 含 SBS

Fig. 2 Under optimal doping concentration and transparent transmission, the noise figure versus the length of the d-EDFA. Input $p_s = 100 \mu\text{W}$. solid line: excluding SBS; dotted line: including SBS

3.2 噪声指数 (NF)

图 2 是不同长度的 d-EDFA, 在透明传输和最佳掺杂浓度下的噪声指数。显然受激布里渊散射使得 EDFA 的 NF 变大, 而且随着 d-EDFA 长度增大, 受激布里渊散射效应使 NF 变化得更快, 也就是说随着传输距离的增长, 受激布里渊散射效应引起的噪声恶化更严重, 使接收端的误码率增大。当 d-EDFA 的长度 $L = 100$ km 时, 不考虑受激布里渊散射效应, NF 为 16.3 dB, 考虑受激布里渊散射效应, NF 为 20.8 dB。

3.3 信噪比 (SNR)

图 3 是透明传输和最佳掺杂浓度下, 不同长度的 d-EDFA 的信噪比。受激布里渊散射效应降低了 d-EDFA 的 SNR, 当 d-EDFA 的长度 $L = 100$ km 时, 不考虑受激布里渊散射效应, d-EDFA 的 SNR 为 29 dB, 考虑受激布里渊散射效应, SNR 为 23.5 dB, 这与前面分析相吻合。

3.4 最佳泵浦周期

图 4 是透明传输和最佳掺杂浓度下, 级联传输 500 km 使用不同长度 L (泵浦周期) d-EDFA 所需的总泵浦功率。不考虑受激布里渊散射效应, d-EDFA 的最佳泵浦周期为 30.6 km, 对

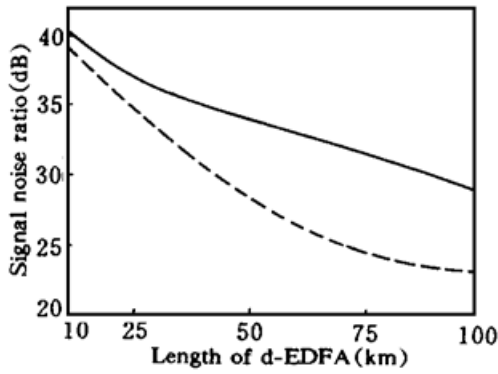


图 3 透明传输和最佳掺杂浓度下,不同长度 d-EDFA 的信噪比。输入 $p_s = 100 \mu\text{W}$,实线:不含 SBS;点线:含 SBS

Fig. 3 Under optimal doping concentration and transparent transmission, the signal-noise ratio versus the length of the d-EDFA. Input $p_s = 100 \mu\text{W}$. solid line: excluding SBS; dotted line: including SBS

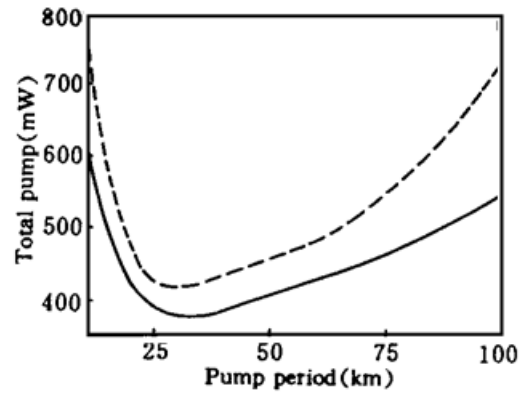


图 4 透明传输和最佳掺杂浓度下,用不同长度(泵浦周期) d-EDFA 传输 500 km 所需总的临界泵浦功率。输入 $p_s = 100 \mu\text{W}$,实线:不含 SBS;点线:含 SBS

Fig. 4 Under optimal doping concentration and transparent transmission, the total necessary pump power for a 500 km transmission versus the length (pump period) of the d-EDFA. Input $p_s = 100 \mu\text{W}$. solid line: excluding SBS; dotted line: including SBS

应的最小泵浦功率为 382 mW,考虑受激布里渊散射效应,则最佳泵浦周期为 24.6 km,最小总泵浦功率为 421 mW。可见受激布里渊散射效应降低了最佳泵浦周期长,增大了所需总泵浦功率,使得传输线既不理想又不经济。

4 结 论

本文利用含有受激布里渊散射效应的传输方程,分析了受激布里渊散射效应对 d-EDFA 的各种特性的影响,结果表明,透明传输和最佳掺杂浓度下,当 d-EDFA 的长度为 100 km 时,受激布里渊散射效应使 d-EDFA 的临界功率从 110 mW 增大到 147 mW;噪声指数从 16.3 dB 增大到 20.8 dB;信噪比从 29 dB 降到 23.5 dB;同时在进行 500 km 系统传输时,最佳泵浦周期从 30.6 km 降到 24.6 km,最小总泵浦功率从 382 mW 增大到 421 mW。

综上所述,受激布里渊散射效应对全光通信、长距离信号传输产生了不良的影响,成为全光孤子通信走向实用化的障碍。但受激布里渊散射效应是可以克服的,鉴于同样是由泵浦功率(功率大于 50 mW)引起的受激拉曼散射效应的作用^[5,9],我们建议用受激拉曼散射效应来补偿受激布里渊散射效应。这部分工作已完成^[10,11]。

参 考 文 献

- 1 L. F. Mollenauer, M. J. Neubelt, S. G. Cohen. Experimental study of soliton transmission over more than 10,000 km in dispersion-shifted fiber. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(15): 1203~1205
- 2 J. P. Gordon, L. F. Mollenauer. Effects of fiber nonlinearities and amplifier spacing on ultra-long distance transmission. *J. Lightwave Technol.*, 1991, **LT-9**(2): 170~173

- 3 K. Rottwitt, A. Bjarkev, J. H. Povlsen *et al.*. Design of long distance distributed EDFA. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(3) : 287~ 288
- 4 S. L. Zhang, J. J. O'Reilly. Effect of stimulated Brillouin scattering on distributed EDFA. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 1993, **5**(5) : 537~ 539
- 5 S. Wen, S. Chi. Study of a lightwave system consisting entire erbium-doped fiber. *Opt. Commun.*, 1993, **101**(1~ 2) : 21~ 24
- 6 C. R. Giles, E. Desurvire. Propagation of signal and noise in concatenated erbium-doped fiber optical amplifiers. *J. Lightwave Technol.*, 1991, **LT-9**(2) : 147~ 154
- 7 A. Yariv. Signal-to-noise consideration in fiber links with periodic or distributed optical amplification. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(19) : 1064~ 1066
- 8 B. Pdersen, A. Bjarklev, J. H. Povlsen *et al.*. The design of erbium-doped fiber amplifiers. *J. Lightwave Technol.*, 1991, **LT-9**(9) : 1105~ 1112
- 9 C. Lester, K. Rottwitt, J. H. Povlsen *et al.*. Raman effect in transparent distributed erbium-doped fiber. *Opt. Commun.*, 1994, **106**(4~ 6) : 183~ 186
- 10 Li Hong, Chen Haijan, Yang Xianglin. Compensations of stimulated Brillouin scattering with stimulated Raman scattering in d-EDFA. *Chinese J. of Lasers*, 1996, **5**(5) : 409~ 414
- 11 李 宏, 陈海娟, 杨祥林. 沿传输方向掺杂浓度渐变分布式掺铒光纤放大器的模型. *通信学报*, 1996, **17**(5) : 82~ 87

Study of Stimulated Brillouin Scattering Effect in Distributing EDFA

Li Hong Yang Xianglin

(Dept. Electronics Engineering, Southeast University, Nanjing 210096)

Abstract In this paper, we report the study of the effect of SBS on various properties of the distributing erbium doped fiber amplifier (d-EDFA) using a convective equation. The result shows that because of SBS, the necessary pump powers increase, the noise figure becomes big, the signal-noise ratio decreases, and the optimal pump period becomes short.

Key words d-EDFA, stimulated Brillouin scattering effect, noise, optimal pump period