

分布式掺铒光纤放大器的理论分析

庞 勇 安浩哲 叶 勇 蒋佩璇 徐大雄

(北京邮电大学无线电工程系, 北京 100088)

提要 给出了一种分析分布式掺铒光纤放大器的理论方法,可以对放大器的信号增益和泵浦吸收进行分析,并能够为分布式掺铒光纤放大器的设计提供理论依据。通过推导得出了基本公式,并就一些特殊情况作了讨论。该方法适用于 1480 nm 和 980 nm 泵浦的放大器系统。

关键词 光纤,掺杂光纤,光纤放大器,分布式光纤放大器

1 引 言

掺铒光纤放大器的出现使 1550 nm 窗口光纤通信系统的性能得到了极大的改善。在光纤传输线的两端或者中间插入一段掺铒光纤,并用适当的光源对其进行泵浦,是集总式掺铒光纤放大器在光纤通信系统中应用的实际模式,随着理论和实验的发展,一种新型的分布式掺铒光纤放大器引起了广泛的兴趣。

分布式掺铒光纤放大器利用低掺杂浓度的掺铒光纤替代光纤传输线^[1],在适当光源的泵浦下,光信号可以无损耗地在光纤中传输,这种特性对光纤通信系统,特别是海底光缆通信系统以及光孤子通信系统,是非常有意义的。

分布式掺铒光纤放大器的目的在于补偿光信号的传输损耗,因而是一个典型的低增益放大器系统,可以采用低增益放大器模型^[2]来进行分析,合理地忽略放大的自发辐射(ASE)的影响(研究表明 ASE 对分布式掺铒光纤放大器的增益特性的影响很小^[1]),从而简化推导,但由于分布式放大器的光纤长度远远大于集总式放大器的光纤长度,所以必须考虑光纤的背景损耗。

本文给出一种分布式掺铒光纤放大器的理论分析方法。掺铒光纤放大器存在着从可见光到红外光波带内的数个泵浦波段,泵浦波长在 1480 nm 和 980 nm 波段的集总式掺铒光纤放大器获得了极佳的特性,可以相信在分布式放大器系统中,这两个泵浦波段也是最适宜的选择,因此,本文的推导将针对这两个泵浦波段。另外,由于存在不同的泵浦方式,以及信号光的双向传输问题,本文在推导中包括了任意数目、任意方向的泵浦光和信号光。

2 推 导

为了对分布式掺铒光纤放大器进行理论分析,考虑一段均匀掺杂的铒离子粒子数密度为 ρ 的(低浓度)掺铒光纤。假设掺铒光纤的长度为 L ,有源区横截面积为 A ;光纤中传输的泵浦光

和信号光的总数目为 n , 其中波长为 λ_k (频率为 ν_k) 的第 k 束光的功率为 $P_k(z, t)h\nu_k$, z 是光纤轴线坐标, t 表示时间, $P_k(z, t)$ 是单位时间内通过光纤横截面 (z 处) 的第 k 束光的光子数, 称之为光子数率, 在下文的推导中, 将用光子数率来表示光功率, 并简称为功率; 用 μ_k 来表征光束的传输方向, 即当光束由 $z = 0$ 处进入光纤时, $\mu_k = 1$, 而由 $z = L$ 处进入时, $\mu_k = -1$; 对应于第 k 束光的受激辐射截面和吸收截面分别为 σ_k^e 和 σ_k^a , 光纤背景损耗系数为 α_k^b . 在推导中忽略 ASE 的影响。

对于泵浦波长在 1480 nm 波段的掺铒光纤放大器系统, 泵浦能级与亚稳态能级在同一能级上, 可以用二能级模型分析, 只需考虑 ${}^4I_{15/2}$ 和 ${}^4I_{13/2}$ 两个斯塔克展宽的能级, 假设该二能级上的归一化粒子数密度分别为 $N_1(z, t)$ 和 $N_2(z, t)$, 即 $N_1(z, t) + N_2(z, t) = 1$, 掺铒光纤中的粒子速率方程和光子传递方程可以写为

$$\frac{\partial N_2(z, t)}{\partial t} = -\frac{N_2(z, t)}{\tau_{sp}} - \frac{1}{\rho A} \sum_{j=1}^n \mu_j \left[\frac{\partial P_j(z, t)}{\partial z} + \mu_j \alpha_j^b P_j(z, t) \right] \quad (1)$$

$$\frac{\partial P_k(z, t)}{\partial z} = \rho \mu_k \Gamma_k [(\sigma_k^e + \sigma_k^a) N_2(z, t) - \sigma_k^a] P_k(z, t) - \mu_k \alpha_k^b P_k(z, t) \quad (2)$$

式中, τ_{sp} 是上能级的自发辐射寿命, Γ_k 是第 k 束光与掺铒光纤有源区的重叠因子. 式(1)和(2)分别反映了掺铒光纤中的粒子数守恒和能量守恒. 在稳态条件下, 各量与时间无关, 隐去变量 t , 利用上述二式可以得到

$$\frac{\mu_k}{P_k(z)} \frac{dP_k(z)}{dz} = -(\rho \Gamma_k \sigma_k^a + \alpha_k^b) - \frac{\Gamma_k (\sigma_k^e + \sigma_k^a) \tau_{sp}}{A} \sum_{j=1}^n \mu_j \left[\frac{dP_j(z)}{dz} + \mu_j \alpha_j^b P_j(z) \right] \quad (3)$$

用 P_k^{in} 和 P_k^{out} 分别表示输入到光纤和由光纤输出的第 k 束光的功率 (光子数率), 对上式直接积分可以得到

$$P_k^{\text{out}} = P_k^{\text{in}} \exp \{ [(P_{\text{in}} - P_{\text{out}}) - P_{\text{loss}}] / P_k^{\text{IS}} - \alpha_k L \} \quad (4)$$

式中其它各量的表达式如下

$$P_{\text{in}} = \sum_{j=1}^n P_j^{\text{in}}, \quad P_{\text{out}} = \sum_{j=1}^n P_j^{\text{out}}, \quad P_{\text{loss}} = \sum_{j=1}^n \int_0^L \alpha_j^b P_j(z) dz, \quad \alpha_k = \rho \Gamma_k \sigma_k^a + \alpha_k^b$$

$$P_k^{\text{IS}} = \frac{A}{\Gamma_k (\sigma_k^e + \sigma_k^a) \tau_{sp}} \quad (5)$$

其中 P_{in} 表示从光纤两端输入的功率之和, P_{out} 则表示从光纤两端输出的功率之和, P_{loss} 为掺铒光纤对各束光功率的背景损耗之和, α_k 是掺铒光纤对第 k 束光的总吸收 (损耗) 系数, P_k^{IS} 是一个与掺铒光纤的自身参数密切相关的量, 可以称之为第 k 束光的本征饱和功率. 当然, 上面提到的功率都是用光子数率描述的。

利用(4)式可以预测掺铒光纤中的信号增益和泵浦吸收, 并且能够为分布式掺铒光纤放大器的设计提供理论依据。

对于泵浦波长在 980 nm 波段的放大器系统, 泵浦能级和亚稳态能级是不同的, 还应该考虑泵浦能级 ${}^4I_{11/2}$ 的影响, 用 τ_{ph} 表示该能级上的声子辐射寿命, $N_3(z, t)$ 表示归一化粒子数密度, 现在有 $N_1(z, t) + N_2(z, t) + N_3(z, t) = 1$, 考虑到掺铒光纤中 980 nm 波段的辐射截面为零, 则速率方程和传递方程可以写为

$$\frac{\partial N_3(z, t)}{\partial t} = -\frac{N_3(z, t)}{\tau_{\text{ph}}} - \frac{1}{\rho A} \sum_{j=1}^n \mu_j \left[\frac{\partial P_j(z, t)}{\partial z} + \mu_j \alpha_j^b P_j(z, t) \right] \quad (6)$$

$$\frac{\partial N_2(z,t)}{\partial t} = \frac{N_3(z,t)}{\tau_{ph}} - \frac{N_2(z,t)}{\tau_{sp}} - \frac{1}{\rho A} \sum_{j=1}^n \mu_j \left[\frac{\partial P_j(z,t)}{\partial z} + \mu_j \alpha_j^i P_j(z,t) \right] \quad (7)$$

$$\frac{\partial P_k^{\text{pump}}(z,t)}{\partial z} = \rho \mu_k \Gamma_k \{ \sigma_k^i [N_2(z,t) + N_3(z,t)] - \sigma_k^e \} P_k^{\text{pump}}(z,t) - \mu_k \alpha_k^b P_k^{\text{pump}}(z,t) \quad (8)$$

$$\frac{\partial P_k^{\text{signal}}(z,t)}{\partial z} = \rho \mu_k \Gamma_k \{ (\sigma_k^i + \sigma_k^e) N_2(z,t) + \sigma_k^e N_3(z,t) - \sigma_k^e \} P_k^{\text{signal}}(z,t) - \mu_k \alpha_k^b P_k^{\text{signal}}(z,t) \quad (9)$$

式(6)和(7)中的求和分别对于泵浦光和信号光的变化,而式(8)和(9)则分别描述了泵浦光和信号光的传播。式中参数的定义与前文中的相应定义相同。

考虑到实际的掺铒光纤放大器系统中有 $\tau_{ph} \ll \tau_{sp}$ (相差大约 7 个数量级^[3]), 泵浦能级上的粒子很快通过声子辐射衰落到亚稳态能级, 在稳态条件下, 可以近似地认为 $N_3(z) = 0$, 这样, 由上述四式也可以推出式(3)的形式, 因而得到与 1480 nm 泵浦相同的分析结果, 只是在利用式(5)计算与泵浦光有关的量时, 要令 $\sigma_i^e = 0$ 。

3 讨 论

假设光纤中只传输一束光, 则从式(4)中可以看出, α_k 代表了单位长度掺铒光纤中的总损耗, 这个参数可以利用截断法测定。

如果在分布式掺铒光纤放大器中传输单一信号, 并且只用单一光源进行泵浦, 则由式(4)可以得到信号光无损耗时的泵浦功率为

$$P_P^{\text{OP}} = (\alpha_S L P_S^{\text{IS}} + P_{\text{loss}} \{ 1 - \exp[(\alpha_S P_S^{\text{IS}} / P_P^{\text{IS}} - \alpha_P) L] \})^{-1} \quad (10)$$

对于分布式放大器, 上式可看作是优化泵浦功率表达式, 而对于集总式放大器, 则可认为是泵浦阈值(该泵浦阈值定义为放大器增益为零时的泵浦功率^[2])。

在这种情况下, 利用式(4)也可以得到信号光的增益表达式如下

$$G = 4.343 \times \{ [(P_{\text{in}} - P_{\text{out}}) - P_{\text{loss}}] / P_S^{\text{IS}} - \alpha_S L \} \quad (11)$$

为了利用前面所建立的理论模型进行数值分析, 必须了解掺铒光纤的各种参数。我们采用参考文献[1]和[3]中提供的参数进行计算, 这些参数罗列如下: 掺铒光纤的长度 L 为 100 km, 有源区截面积 A 为 $1.26 \times 10^{-11} \text{ m}^2$, τ_{sp} 为 $9.8 \times 10^{-3} \text{ s}$, Γ_s 和 Γ_p 均为 0.4; 信号光波长取为 1.535 μm , 则 σ_s^e 为 $2.6 \times 10^{-25} \text{ m}^2$, σ_s^i 为 $4.3 \times 10^{-25} \text{ m}^2$, α_s^e 为 $4.6 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$; 泵浦波长为 1480 nm, σ_p^e 为 $1.86 \times 10^{-25} \text{ m}^2$, σ_p^i 为 $0.42 \times 10^{-25} \text{ m}^2$, α_p^e 为 $4.6 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$; 泵浦波长为 980 nm, 则 σ_p^e 为 $2.8 \times 10^{-25} \text{ m}^2$, σ_p^i 为零, α_p^e 为 $2.3 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$; 铒离子掺杂浓度取 $15 \times 10^{20} \text{ ions/m}^3$ 。这里是考虑信号光和泵浦光同向传输(同向泵浦结构)的情况。

图 1 和图 2 分别描述了在 1480 nm 波段不同的泵浦功率下, 输入信号光功率为 1 μW 和 1 mW 时, 信号增益与掺铒光纤长度的变化关系。从图中我们可以清楚地看出信号光功率和泵浦光功率对信号增益的影响。图 3 和图 4 则对 980 nm 波段泵浦的情况进行了类似的描述。

分别比较图 1 与图 3 以及图 2 与图 4, 容易得到, 就分布式掺铒光纤放大器的增益特性而言, 1480 nm 波段泵浦方式优于 980 nm 波段泵浦方式, 这与我们在集总式放大器的研究中得到的结论相反, 但根据式(10)和式(11), 我们对这样的结果不会奇怪。

由上面得到的结果, 可以知道掺铒光纤的背景损耗 P_{loss} 在分布式放大器中起着重要的作用, 它代表掺铒光纤对在其中传输的各束光的背景损耗的总和, 影响着放大器的性能, 由于在

分布式放大器系统中,掺铒光纤的铒离子浓度很低(比集总式系统中的浓度低 3~4 数量级),因而光纤背景损耗的影响是非常显著的。根据一般常识,1480 nm 波段的背景损耗(约 0.2 dB/km)比 980 nm 波段的(约 1.0 dB/km)小得多,所以,虽然在集总式放大器中,980 nm 泵浦的系统性能明显优于 1480 nm 泵浦的系统,但这种优势在分布式系统中被削弱了,进一步的结论有待于实验的证明。

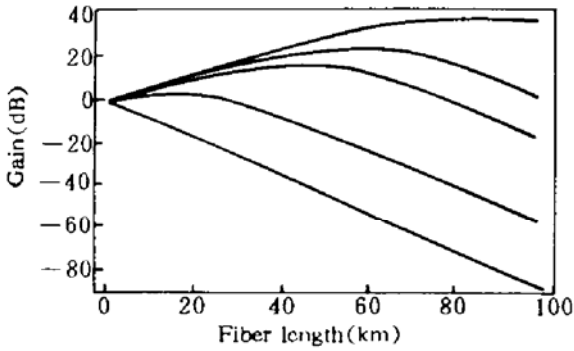


Fig. 1 Variation of gain with respect to fiber length in a 100 km distributed Erbium-doped fiber amplifier. The launched signal power is 1 μ W. The pump wavelength is 1480 nm, and the pump power values are 0, 10, 50, 100, and 1000 mW from lower to upper curves, respectively. The values of the other parameters are given in the text

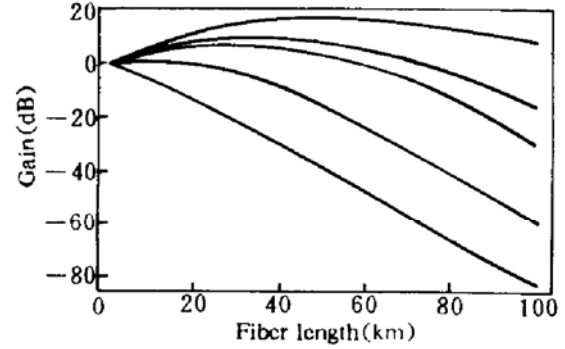


Fig. 2 Variation of gain with respect to fiber length in a 100 km distributed Erbium-doped fiber amplifier. The launched signal power is 1 mW. The pump wavelength is 1480 nm, and the pump power values are 0, 10, 50, 100, and 1000 mW from lower to upper curves, respectively. The values of the other parameters are given in the text

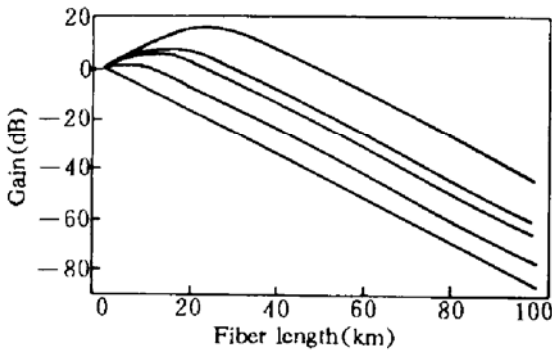


Fig. 3 Variation of gain with respect to fiber length in a 100 km distributed Erbium-doped fiber amplifier. The launched signal power is 1 μ W. The pump wavelength is 980 nm, and the pump power values are 0, 10, 50, 100, and 1000 mW from lower to upper curves, respectively. The values of the other parameters are given in the text

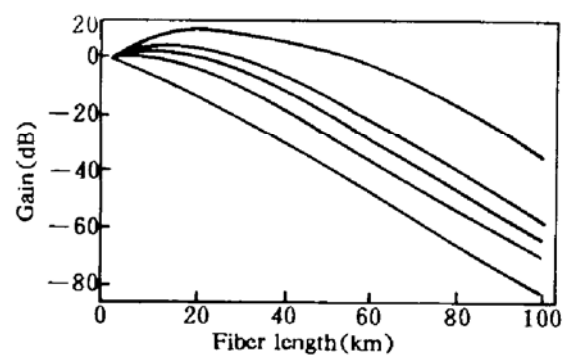


Fig. 4 Variation of gain with respect to fiber length in a 100 km distributed Erbium-doped fiber amplifier. The launched signal power is 1 mW. The pump wavelength is 980 nm, and the pump power values are 0, 10, 50, 100, and 1000 mW from lower to upper curves, respectively. The values of the other parameters are given in the text

本文的结果也可以应用于集总式掺铒光纤放大器系统的分析,事实上,在集总式放大器的分析中,掺铒光纤的背景损耗被忽略了,因此可以认为 $P_{\text{loss}} = 0$,这样,本文中的结果就与参考文献[2]的结果相同。

4 结 论

由于推导中忽略了 ASE 的影响,所以该方法不能分析放大器的噪声特性,但是,分布式掺铒光纤放大器的增益极低,ASE 噪声也相应地很低,另外,由于分布式系统的光纤很长,其它噪声产生的可能性增加,因此,可以预言分布式系统的 ASE 噪声不再象集总式系统中一样是放大器噪声的主要来源。

参 考 文 献

- 1 P. Urquhart, T. J. Whitley. Long span fiber amplifiers. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(24): 3503~3509
- 2 A. A. M. Saleh, R. M. Jopson, J. D. Evankow *et al.*. Medeling of Gain in Erbium-Doped Fiber Amplifiers. *IEEE Photonics Techn. Lett.*, 1990, **2**(10): 714~717
- 3 C. R. Giles, E. Desurvire. Propagation of Signal and Noise in Erbium-Doped Fiber Optical Amplifiers. *J. of Lightwave Technology*, 1991, **9**(2): 147~154

A Theoretical Analysis of Distributed Erbium-Doped Fiber Amplifiers

Pang Yong An Haozhe Ye Yong Jiang Peixuan Xu Daxiong

(Department of Radio Engineering, Beijing University of Posts & Telecommunications, Beijing 100088)

Abstract This paper offered a theoretical method for the analysis of distributed EDFA's, which can analyze the signal gain and pump absorption of the amplifiers. With it, we can carry out the optimal design for distributed EDFA's. We derived the basic formula, and discussed it under some special conditions. This method is suited for amplifier systems pumped at 1480 nm and 980 nm bands.

Key words optical fiber, doped fiber, fiber amplifier, distributed fiber amplifier