

由 Giles 模型对 L-band EDFA 的理论分析*

谭莉 丁永奎 王衍勇 薛挺 李世忱

(天津大学精密仪器与光电子工程学院, 国家教育部光电信息技术科学重点实验室, 天津 300072)

摘要 本文通过运用 Giles 模型对 L-band EDFA 在不同泵浦波长下的增益、不同泵浦功率与光纤长度的关系以及各种增益特性等进行了数值模拟, 并同时辅以 C-band EDFA 进行比较计算, 从理论上对 L-band EDFA 的特性进行了较为详细的分析说明, 并得出了新颖的结论.

关键词 Giles 模型; 长波段; 光纤放大器; 密集波分复用; 增益

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A

0 引言

近年来, 不断增长的通信业务对密集波分复用 (DWDM) 系统传输容量的要求日益增大, 利用 C-band 以外的 L-band 实现对 C + L 波段信号的同时传输, 可避免传统扩容方法所面临的种种技术难题, 直接在现有的 DWDM 系统中实现扩容. 而掺铒光纤放大器 (EDFA) 作为 DWDM 系统中最为关键的器件, 人们对其带宽也随之提出了新的要求. 因此, 能够扩大传统 EDFA 带宽的 L-band EDFA 成为当今研究的一大热点^[1], 它的可实现性决定着宽带 DWDM 系统是否能够实现以及性能的优劣. 在光纤放大器的理论计算中运用得最为广泛的模型之一为 Giles C. R. 等提出来的 Giles 模型^[2]. 本文通过分析运用 Giles 模型, 结合厂家提供的参量, 分别对 L 带和 C 带放大器进行了比较计算, 对 1530 nm 泵浦下 L-band EDFA 的增益, 以及不同信号光输入时, 铒光纤的最佳长度与输入泵浦功率的关系等进行了数值模拟, 并得出了新颖的结论.

1 L-band EDFA 的特性分析

1.1 Giles 模型

采用二能级系统近似, 假设光纤中有 k 种不同波长的光共同传输, 则通过一系列的推导和化简, 有^[2]

$$\frac{\bar{n}_2}{\bar{n}_1} = \frac{\sum_k \frac{P_k \alpha_k}{h\nu_k \zeta}}{1 + \sum_k \frac{P_k (\alpha_k + g_k^*)}{h\nu_k \zeta}} \quad (1)$$

$$\frac{dP_k}{dz} = u_k (\alpha_k + g_k^*) \frac{\bar{n}_2}{\bar{n}_1} P_k + u_k g_k^* \frac{\bar{n}_2}{\bar{n}_1} m h \nu_k \Delta \nu_k - u_k (\alpha_k + l_k) P_k \quad (2)$$

式中 $\bar{n}_i(z) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} n_i(r, \Phi, z) r dr d\Phi / \pi b_{\text{eff}}^2, i = 1, 2, t$, 为平均掺杂密度, P_k 为光纤中传输的某一波长的光功率, h 为普朗克常量, ν_k 为光波频率, 当 $u_k = 1$ 时表示光束为前向传输, $u_k = -1$ 时为后向传输. $m h \nu_k \Delta \nu_k$ 对 ASE 有贡献, 为噪声项, 由于光纤中的基模仅存在两种偏振态, 因此取 $m = 2$. $\alpha_k, g_k^*, \zeta_k, l_k$ 分别表示吸收系数、增益系数、饱和参量和背景损耗, 统称为 Giles 参量, 它们都是便于准确测量的参量, 任何生产铒纤的厂家都会直接或间接的给出这些参量. 其中 $\zeta_k = A_e n_i / \tau, A_e$ 为有效纤芯截面, τ 为亚稳态能级寿命, n_i 为总粒子数密度, n_1 和 n_2 为基态和激发态的粒子数密度.

以下运用 Giles 模型进行计算机模拟求解, 并通过与 C-band EDFA 比较, 具体分析 L-band EDFA 的泵浦特性和增益特性. 计算中所用的铒纤为加拿大 Coractive 的 EDF-L1500 (L 带) 和朗讯的 EDF-MP980 (C 带), 所需的各种参量如下: 1) EDF-L1500: $r_c = 1.2 \mu\text{m}, n_1 = 6.4 \times 10^{25} / \text{m}, \tau = 10 \text{ms}, l_p = l_s = 0.01 \text{dB/m}, \alpha_{p, 1480} = 9.86 \text{dB/m}, \alpha_{p, 980} = 14.28 \text{dB/m}, g_{p, 1480}^* = 2.9 \text{dB/m}, g_{p, 980}^* = 0 \text{dB/m}$; 2) EDF-MP980: $r_c = 1.44 \mu\text{m}, n_1 = 8.55 \times 10^{24} / \text{m}, \tau = 10 \text{ms}, l_p = l_s = 0.00282 \text{dB/m}, \alpha_{p, 1480} = 2.544 \text{dB/m}, \alpha_{p, 980} = 4.57 \text{dB/m}, g_{p, 980}^* = 0 \text{dB/m}, g_{p, 1480}^* = 0.8 \text{dB/m}$. 其它各波长处的吸收系数和增益系数可分别由这两家公司提供的数据获得.

1.2 泵浦特性

迄今为止, 从可见光到波长为 800 nm、980 nm、1480 nm 的大功率激光器均可用作 EDFA 的泵浦源^[3], 但综合考虑各种因素, 目前使用得最多的还是 980 nm 和 1480 nm 的 LD 泵浦管. 而考虑到 L-band EDFA, 由于不同泵浦波长所对应的饱和和泵浦条件下粒子反转度的量子极限不同, 人们发现波长更长的 1530 nm 波段泵浦源相对于 980 nm 和 1480 nm 泵浦而言, 能达到更低的上能级粒子反转度 (0.35 ~

*教育部博士点基金资助项目 (1999005615)
Tel: 022-27404468 Email: tanli-4468@163.com
收稿日期: 2003-03-07

0.4)^[4],而这一点恰好满足 L 带铒纤的增益位移特性,且又由于铒离子的吸收峰在 1530 nm 附近,因此对于 L-band EDFA,此波段是一个甚佳的泵浦带,具有比 980 nm 和 1480 nm 更高的泵浦效率.

图 1 为通过数值模拟得到的 L-band EDFA 分别在 980 nm、1480 nm、1530 nm 泵浦下的增益曲线. 光纤长度为 60 m, 泵浦功率都为 150 mW, 输入信号功率为 -10 dBm. 由图可以看出,在相同条件下,采用 1530 nm 波长泵浦,可获得比 980 nm 与 1480 nm 更高的增益,且增益相对也更为平坦.

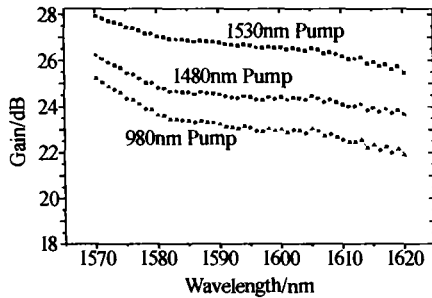


图 1 L-band EDFA 在 980 nm、1480 nm、1530 nm 泵浦下的增益

Fig. 1 Gains of L-band EDFA at different pump wavelength (980 nm, 1480 nm, 1530 nm)

图 2 为不同泵浦功率时,信号增益与光纤长度的关系. 选用的信号波长为 1590 nm, 同样 -10 dBm 输入. 由图可以看出,对应一定的泵浦功率, L-band EDF 也存在一最大增益长度(图中各曲线的拐点处),且随着泵浦功率的提高,增益增大(可参看图 5),最大增益长度向后移. 这是因为泵浦功率增

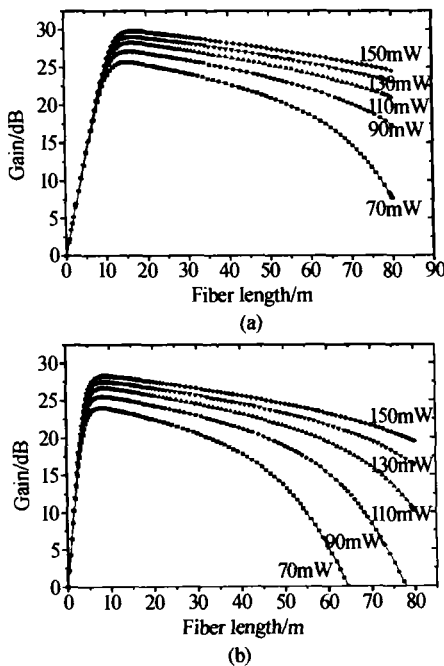


图 2 L-band EDFA 在不同功率的 1480 nm (a) 和 980 nm (b) 泵浦下的最佳光纤长度

Fig. 2 Optimal EDF lengths at different pump power with 1480 nm pump LD (a) and 980 nm pump LD (b)

大,使得粒子能在更长的光纤范围内形成反转;如果铒纤较短,对泵浦光吸收较少,反转粒子数也少,信号光有可能得不到足够的增益. 此外,仔细比较 (a)、(b) 两图可以发现,在同一泵浦功率下,采用 1480 nm 泵浦可获得比 980 nm 更高的增益;但采用 980 nm 泵浦时,所需的最佳光纤长度较短. 这说明 1480 nm 泵浦下,功率转换效率(PCE)较高,这是由于 1480nm 更接近于信号波长的缘故,因此其 PCE 明显高于 980 nm 泵浦. 而 980 nm 泵浦下,量子转换效率(QCE)较高,其主要原因是 $g_{p,980}^* = 0$ dB/m, 泵浦光被充分吸收. 又量子转换效率为

$$QCE \equiv \frac{\phi_s^{out} - \phi_s^{in}}{\phi_p^{in}} \times 100\% \quad (3)$$

式中 ϕ_s^{out} 、 ϕ_s^{in} 、 ϕ_p^{in} 分别为输出和输入端信号光及输入泵浦光单位时间内的光子数. 采用 980 nm 泵浦时,泵浦光子能在较短的长度内很快转化为信号光子而获得较大的增益.

虽然最大增益长度随泵浦光的增大而增长,但两者不存在线性关系,如图 3 为泵浦功率与最佳光纤长度的关系. 其中,泵浦波长都是 980 nm, 信号输入功率为 -10 dBm. 由图可以看出,随着泵浦功率的进一步增大,最佳光纤长度也存在饱和的趋势. 且在同一泵浦功率下,信号波长越长,所需的光纤长度也越长,这是由于铒光纤的吸收谱和发射谱决定的. 波长越长时,需要更长的光纤长度以充分吸收泵浦光,来提供更多的反转粒子数. 此外,对应相同的信号波长,若使泵浦功率增加相同的值,相应最佳

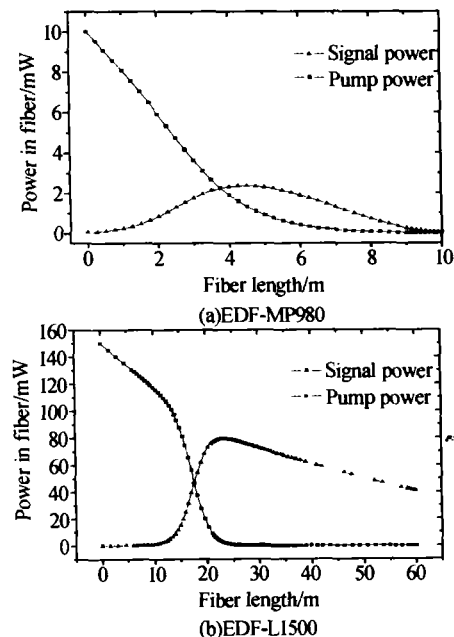


图 3 泵浦与最佳光纤长度的关系: $\lambda_p = 980$ nm, $P_p^{in} = -10$ dBm

Fig. 3 Fiber length as a function of pump power: $\lambda_p = 980$ nm, $P_p^{in} = -10$ dBm

长度的增加量, L 带比 C 带要小的多. 这是由于 L 带掺铒浓度很高, 对长度比较敏感的缘故. 这一点对于 L-band EDFA 的设计具有重要的参考价值.

1.3 增益特性

泵浦特性与增益特性其实是互相联系的. 如图 2 也说明 L-band EDFA 的增益特性. 在最佳长度附近, 泵浦光被完全吸收, 此时的泵光能量开始低于能够提供增益的泵浦阈值, 若再增加长度, 信号光能量将被铒离子吸收, 而导致增益下降. 图 4 所示的信号光与泵浦光沿光纤传输过程中的功率分配情况也说明了此问题. 图 4(a) 的信号波长为 1550 nm, 功率为 -13 dBm, 初始泵浦功率为 10 mW; 图 4(b) 的信号波长为 1590 nm, 输入功率为 -30 dBm, 初始泵浦功率为 150 mW. 从图可见, 泵浦光沿着光纤的传输过程中, 能量逐渐向信号光转移; 而信号光在光纤中的某处存在一功率最大值, 此时对应的光纤长度即为最佳光纤长度. 比较(a)、(b)两图, 我们发现, 对于 C 带掺铒, 泵浦光在最佳长度附近缓慢衰减到零; 而对于 L 带掺铒, 泵浦光在最佳长度附近很快被完全吸收, 因为 L 带掺铒的吸收系数相当高.

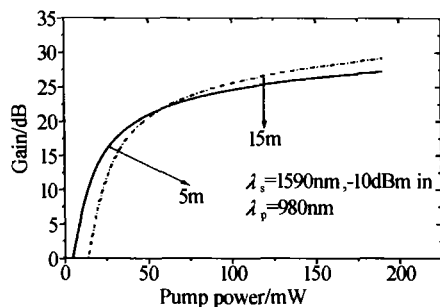


图 4 泵浦与信号功率沿光纤传输过程中的情况

Fig. 4 Changes of pump and signal power along fibers

图 5 则说明在泵浦功率较小时, 增益随泵浦增加较快, 而当泵浦功率达到某一值时, 则随泵浦的加大逐渐变得缓慢而趋于饱和. 因为此时, 下能级粒子数几乎已完全反转, 继续增加泵浦功率对反转粒子数贡献不大. 且光纤长度越长, 泵浦阈值越高.

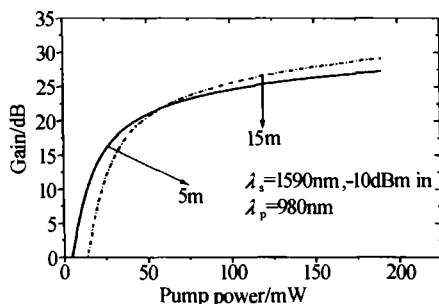


图 5 不同掺铒长度时泵浦功率与信号增益的关系

Fig. 5 Gain as a function of pump power in different fiber length

除了泵浦的影响外, 掺杂浓度对掺铒光纤放大器的增益特性也有着显著的影响. 若掺杂过低, 在掺

杂离子的总有效数少于入射光子的部位, 上能级粒子数有可能被耗尽, 因此信号光的放大受限于可利用的有限离子数目. 反之若掺杂过多, 则会出现两种情况: 其一是出现所谓的浓度猝灭问题, 即高掺杂时的能量上转换现象, 使得激光上能级的有效粒子数减少; 其二, 高掺杂将会导致玻璃基质中产生结晶现象, 这对激光的形成也是不利的. 要解决高掺杂所带来的限制, 其方法是在掺铒光纤中加入一些 Al_2O_3 , 有助于铒离子均匀分布. 如 Coractive 的 C 带掺铒中, 氧化铝的含量为 3.5 Mol%, 而 L 带掺铒中, 氧化铝的含量则高达 6 Mol%, 因此, 其掺杂浓度可达到一较高的值.

一般说来, 在一定的范围内, 掺杂浓度越大, 所能提供的增益越大, 而 EDF 的最佳增益长度则越短. 如图 6 所示. 图中掺杂浓度为 $n = 6.4 \times 10^{25}$ 与 $n = 3.6 \times 10^{25}$ 的两种光纤为 Coractive 提供的 L 带掺铒: EDF-L1500 与 EDF-L900; 掺杂浓度为 $n = 8.55 \times 10^{24}$ 的光纤为 Lucent 提供的 C 带掺铒: EDF-MP980. 计算中选用信号波长 1590 nm、70 mW、980 nm 泵浦. 从图可以看到, 达到最大增益时, 三种光纤所需的最佳长度分别为 6 m、10 m 和 23 m. 这对 L-band EDFA 最佳长度的选择很有意义, 说明采用高掺杂的掺铒, 所需的光纤长度使用量将大大减少. 此外, 在相同掺杂浓度及泵浦功率下掺杂半径越小增益越大, 这是由于泵浦光在光纤截面的分布是不均匀的, 纤芯中心处最大, 向边缘逐渐减小, 当泵浦光能量随半径增大而小于阈值时, 泵浦光不能使铒离子反转分布而被浪费. 因此减少掺杂半径, 使得泵浦光在整个掺杂区域内都大于阈值, 有利于提高泵浦效率.

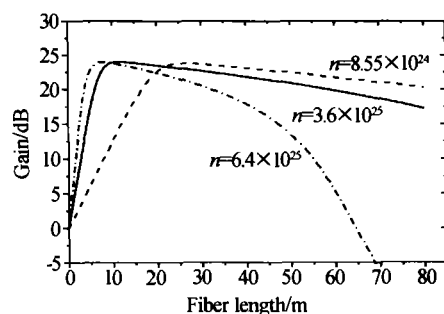


图 6 不同掺铒浓度下的增益与光纤长度的关系

Fig. 6 Gain as a function as EDF length with different concentration

2 结论

为了进一步发掘通信带宽的潜力, L-band EDFA 的开发应用已逐渐提上了日程. 而适用于研究 C-band EDFA 的 Giles 模型, 也为 L-band EDFA 的研究提供了便利的条件. 本文通过运用 Giles 模型, 对 C-band EDFA 与 L-band EDFA 进行了比较研

算,从理论上较为详细地分析了 L-band EDFA 的泵浦特性和增益特性,为 L-band EDFA 的设计提供了一定的理论指导.

参考文献

- 1 Flood Felton A. L-band Erbium-doped fiber amplifiers. *OFC'* 2000,2000, WG1-2
- 2 Giles C R, Desurvire E. Modeling Erbium-doped fiber amplifiers. *Journal of Lightwave Technology*, 1991,9(2):271
- 3 杨祥林等编著. 光放大器及其应用. 北京: 电子工业出版社, 2000,6
Yang X L. Optical amplifiers and their applications. Beijing: Publish House of Electronics Industry, 2000, June
- 4 Massicott J F, Armitage J R, Wyatt R, *et al.* High gain, broadband, 1.6 μm Er^{3+} doped silica fiber amplifier. *Electronics Letters*, 1990,26(20):1645 ~ 1646

Theoretical Analysis of L-band EDFA by Giles Model

Tan Li, Ding Yongkui, Wang Yanyong, Xue Ting, Li Shichen

*College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University,
Laboratory of Opto-electronic Information Science and Technology, Tianjin 300072, China*

Received date: 2003-03-07

Abstract The L-band and C-band EDFAs are calculated and compared by using Giles Model. The gain of L-band EDFA pumped by different wavelengths and the relationship between the optimum length of L-band EDF and input pump power at different signal wavelengths, are numerically simulated as well as many characteristics of the gain of L-band EDFA. Some novel results are also got by the theoretical analysis above.

Keywords Giles Model; Long-wavelength band; Fiber Amplifier; DWDM; Gain

Tan Li received the B. S. and M. S. degrees in physical electronics from Tianjin University, China, in 2000 and 2003, respectively.

