

掺铒光纤放大器增益的温度依赖关系

梁铨廷

N. Granpayeh P. L. Chu

(广州师范学院物理系, 广州 510400) ((澳)新南威尔士大学电子工程系)

摘 要 报道掺铒光纤放大器增益随温度变化的依赖关系, 提出了一个解释这种依赖关系的数学模型。此模型基于如下假设: 由于温度的变化, 引起处在基态和激发态的斯塔克(Stark)能级上的掺铒离子(Er^{3+})浓度的重新分布, 从而引发光纤发射截面和吸收截面的变化。理论结果与实验结果符合很好。

关键词 光纤放大器, 增益, 发射截面, 吸收截面。

1 引 言

掺铒光纤放大器(EDFA)在波长 $1.55 \mu\text{m}$ 的长距离通讯系统中有着重要的应用。目前, 它已经在一些实用的通讯系统中取代以光电和电光转换的再生中继机, 成为通信系统的光信号放大元件^[1]。这有利于提高通讯系统的传输数字速率和扩大系统的带宽容量。表征光纤放大器性能的最重要的参数是它的增益, 近年来, 人们已经注意到放大器增益随温度的变化。Desurvire 等人曾报道通过将放大冷却至液氮温度 77 K 下, 放大器的增益有 3 dB 的增加^[2]。Millar 等人测量了在三个不同温度 77 K 、 300 K 和 600 K 下, 掺铒光纤的吸收, 荧光与增益的变化, 指出放大器增益的变化是由于光纤吸收和荧光光谱的变化所引起的^[3]。Kagi 等人则测量了不同掺杂浓度下光纤的温度依赖关系, 认为增益随温度增加而减小是由于饱和布居数反转变化的^[4]。本文报道, 当温度从室温(295 K)降到 77 K 时, 光纤放大器增益的变化约为 3.5 dB 。基于温度变化引起光纤发射截面和吸收截面变化的假设, 本文提出了一个相当完满解释放大器增益随温度变化的数学模型。

2 实验结果

测量掺铒光纤放大器增益的实验装置如图 1 所示。图中的掺铒光纤、定向耦合器和激光器是掺铒光纤放大器的三大组成部分。本实验使用氩离子激光器作泵浦光源, 工作波长为 514 nm 。当激光器发出的泵浦光和白光光源发出信号光通过耦合器进入掺铒光纤时, 铒离子吸收泵浦光, 其能量于短时间内存储在光纤的纤芯中。在信号光光子的作用下, 铒离子通过受激发射, 使信号光产生更多的光子。因此, 随着泵浦和信号光沿光纤行进过程中, 泵浦光被吸收, 信号光得到放大。利用光电二极管和计算机可以纪录和计算出放大器的增益大小。

实验中使用的掺铒光纤具有以下参数：纤芯半径为 2.54 μm，掺铒半径为 1.5 μm，铒离子浓度 500 ppm(使用的另一根光纤的浓度为 300 ppm)，光纤长度为 3 m，衰减为 3.2 dB/m。当把掺铒光纤放置于室温(295 K)和液氮温度 77 K 时，放大器的增益光谱如图 2 所示，(实线对应于浓度为 500 ppm 的光纤，虚线对应于光纤浓度 300 ppm)，峰值增益(对应于信号光波长 1.536 μm)的变化约为 3.5 dB。表 1 列出了两根典型光纤在两种温度下的峰值增益及其大小变化。

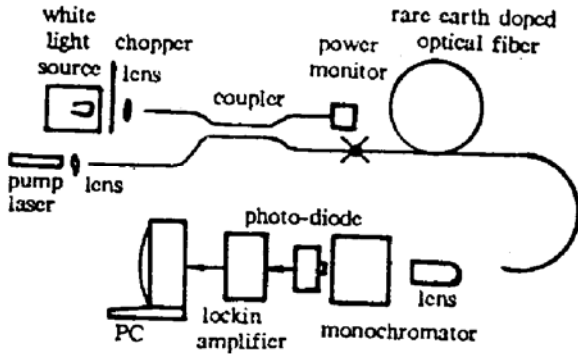


Fig. 1 Experimental setup used for amplifier gain measurements

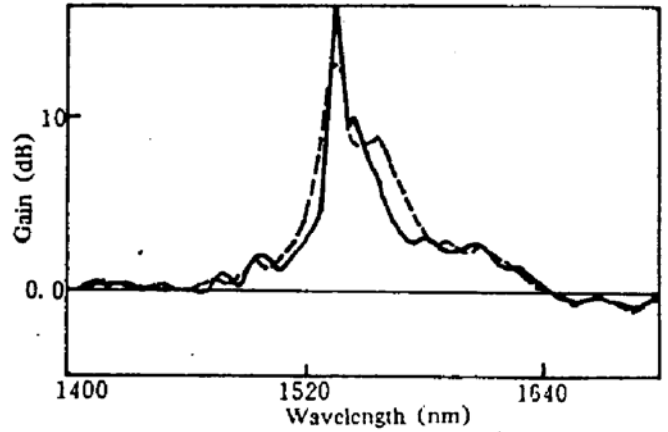


Fig. 2 Gain spectrum for EDFA

Table 1 Change of gain of EDFA at temperatures $T = 77\text{ K}$ and 295 K

fiber No.	peak gain (77K)	peak gain (295K)	change of gain
fiber 1 (500ppm)	15.9 dB	12.4 dB	3.5 dB
fiber 2 (300ppm)	11.5 dB	8.2 dB	3.2 dB

3 理论解释

3.1 数学模型

在理论上，光纤放大器的增益可以由下式计算：

$$G = 4.343 \Gamma \int_0^L [\sigma_e N_2(z) - \sigma_a N_1(z)] dz \tag{1}$$

式中 Γ 为光纤芯中信号场径向分布和铒离子径向分布的重叠积分值， L 为光纤长度， σ_e 和 σ_a 分别为光纤的发射截面和吸收截面， $N_1(z)$ 和 $N_2(z)$ 分别为基态和激发态的铒离子浓度，它们是光纤长度方向坐标 z 的函数。 σ_e 和 σ_a 与光纤长度坐标 z 无关，而与温度有关，这是因为不论基态 1 或激发态 2 都会由于斯塔克分裂产生一些亚能级，称为斯塔克能级。 σ_e 和 σ_a 与铒离子处于这些亚能级上的几率有关，而几率又依赖于温度。根据文献[5]的测定，铒离子的基态和激发态分别有 8 个和 7 个斯塔克能级，它们的能量值如表 2 所列。

Table 2 Stark levels of Er^{3+}

Stark level	1	2	3	4	5	6	7	8
ground state energy (cm^{-1})	0	51	125	201	268	390	440	505
excited state energy (cm^{-1})	0	96	163	222	305	330	357	--

按照波耳兹曼分布定律，在温度 T 下处在斯塔克能级上的铒离子数应为

$$N_{lm} = N_i (e^{-E_{lm}/kT} / \sum_{n=1}^{7,8} e^{-E_{in}/kT}) = p_{lm} N_i \tag{2}$$

式中 k 为波耳兹曼常数， p_{lm} 为铒离子处在能级 lm 上的几率。当 $l = 1$ ，表示铒离子处于基态；

$l = 2$, 铒离子处于激发态。对应于基态和激发态的斯塔克能级, m 分别取 1 至 8 和 1 至 7。由 (2) 式得到 p_{lm} 后, 发射截面 σ_e 吸收截面 σ_a 分别为^[6]。

$$\sigma_e = \sum_{i=1}^7 \sum_{j=1}^8 \sigma'_{ji} p_{2i} p_{1j}, \quad \sigma_a = \sigma_e / \exp [(\varepsilon - h\nu) / kT]. \quad (3)$$

$$\sigma'_{ji} = \frac{\sigma_{ji}^2}{1 + 4(\lambda / \Delta\lambda_{ji})^2 (1 - \lambda / \lambda_{ji})^2}, \quad \sigma_{ji}^2 = \frac{\lambda_{ji}^4}{4\pi^2 n^2 c \tau_{ji} \Delta\lambda_{ji}} \quad (4)$$

式中 n 为纤芯折射率, ε 为依赖于温度的激发能, 即在温度 T 下将铒离子由基态 1 激发到激发态 2 需要的能量。对于掺铒光纤, 受激状态的寿命约为 10 ms (即 $\tau_{ji} = 10$ ms), 并可假设对于所有跃迁相同。 $\Delta\lambda_{ji}$ 可取洛仑茨谱宽, $\Delta\lambda_{ji} = 11.5$ nm, 并认为对于所有跃迁均可取此值。

(1) 式中的基态和激发态铒离子浓度 $N_1(z)$ 和 $N_2(z)$ 是光纤长度方向坐标 z 的函数, 它们可通过求解下面的非线性速率方程组得到^[7]:

$$\left. \begin{aligned} dP_p(z)/dz &= P_p(z)\sigma_a[N_{tot} - N_2(z)] - P_p(z)\sigma_{em}N_2(z), \\ dP_s(z)/dz &= P_s(z)r(z), \quad dP_f(z)/dz = \mu(z)h\nu\Delta\nu r(z) + P_f(z)r(z), \\ r(z) &= \eta_s\sigma_s[(1 + \alpha)N_2(z) - \alpha N_{tot}], \quad \mu(z) = N_2(z) / [(1 + \alpha)N_2(z) - \alpha N_{tot}] \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

P_p, P_s 和 P_f 分别为泵浦光, 信号光和被放大的自发发射功率, N_{tot} 为总铒离子浓度, σ_{em} 为激发态吸收截面, η_s 为光纤芯内的信号功率比, α 为另一个接近于 1 的比例系数。在平衡条件下, 即 $dN_2(z)/dt = 0$, 则有^[7]

$$N_2(z) = \frac{N_{tot}[W_p(z) + \alpha W_s(z)]}{W_p(z) + (1 + \alpha)W_s(z) + 1/\tau} \quad (6)$$

式中 W_p 和 W_s 分别为泵浦速率和受激发射速率。

3.2 计算结果

按照 (3) 式, 用计算机算出的几种温度下 ($T = 4.2$ K, 77 K 和 295 K) 的发射截面 σ_e 如图 3 所示, 它们与文献[5]的实验结果相符很好。图 4 是计算出的两种温度下 ($T = 77$ K 和 295 K)

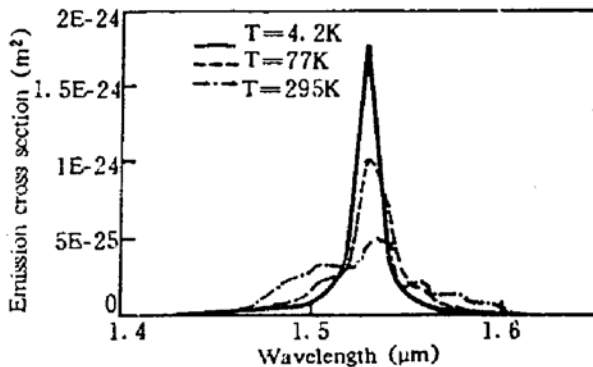


Fig. 3 Calculated emission cross section of EDFA

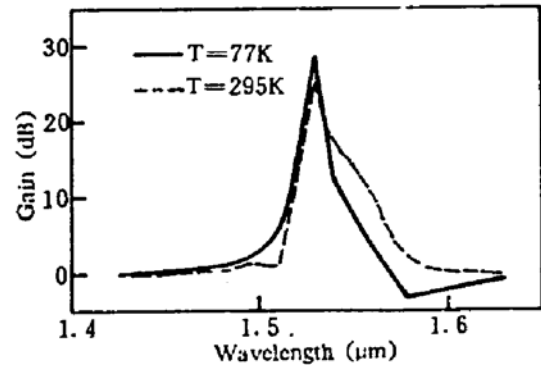


Fig. 4 Calculated gain spectrum of EDFA

的放大器的增益谱, 计算中取泵浦光功率为 50 mW, 波长 514 nm, 输入信号光功率 100 nW。由图可见, 在两种不同温度下, 放大器的峰值增益变化为 3.9 dB, 与本文实验结果——峰值增益变化 3.5 dB 相符合很好。计算还表明, 如果信号光功率为 1 μ W 和 20 μ W, 在上述温度变化条件下, 光纤放大器的峰值增益变化为 2.8 和 1.1 dB, 这说明光纤放大器增益的变化不只是温度的函数, 也是输入信号光强度的函数。这些结果已为本文的实验所证实。

讨 论 本文报道的实验再次显示光纤放大器增益对温度的依赖关系, 因此光纤放大器增益的温度稳定性是值得注意的问题。文中提出的光纤放大器增益随温度变化的数学模型及实例

计算,相当完满地解释了光纤放大器的这一效应。

本文理论计算与实验结果的偏差,可能来源于 1) 铒离子处在基态和激发态的斯塔克能级的数目,只根据文献[5]的测定分别取为 8 个和 7 个,实际的能级分裂可能还有许多更精细的结构。如果考虑这些更精细的结构,可能会使理论计算(发射截面,吸收截面和增益曲线的形状)更符合实验结果。2) 在计算中作了一些假设,它们可能不完全符合实际情形。例如,(1)式中 Γ 通常对于单模光纤取为 1,这可能是理论增益值比实验值大的原因。其次,激发态寿命和洛仑茨线宽对于不同的跃迁均取为相同值,并且不依赖于温度,这也可能不符合实际。但是,本文提出的计算模型是相当完善的,使得作者能够直接计算温度变化的光纤放大器的增益大小,光纤的发射截面和吸收截面,而且理论计算与实验结果相符很好。

作者感谢澳大利亚新南威尔士大学光通讯实验室的同事为本实验制作掺铒光纤和给予的许多帮助,感谢澳大利亚国家研究委员会(ARC)提供的资助。

参 考 文 献

- [1] R. J. Mears, S. R. Baker, Erbium doped fiber amplifiers and laser. *Opt. & Quant. Electron.*, 1992, **24**(5): 517~538
- [2] E. Desurvire, J. R. Simpson, P. C. Becker, High-gain erbium-doped traveling-wave fiber amplifier. *Opt. Lett.*, 1987, **12**(11): 888~890
- [3] C. A. Millar, T. J. Whitley, S. C. Fleming, Thermal properties of an Er-doped fiber amplifier. *Proc. IEEE*, 1990, **137**(3): 155~158
- [4] N. Kagi, A. Oyobe, K. Nakamura, Temperature dependence of the gain in Er-doped fibers. *J. Lightwave Tech.*, 1991, **19**(2): 261~266
- [5] E. Desurvire, J. R. Simpson, Evaluation of $^3I_{15/2}$ and $^4I_{13/2}$ Stark-level energies in erbium-doped aluminosilicate glass fibers. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(10): 547~549
- [6] W. J. Miniscalco, R. S. Quimby, General procedure for the analysis of Er-cross sections. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(4): 258~260
- [7] P. R. Morkel, R. I. Laming, Theoretical modeling of erbium-doped fiber amplifiers with excited state absorption. *Opt. Lett.*, 1989, **14**(19): 1062~1064

Temperature Dependence of the Gain in Er-Doped Fiber Amplifiers

Liang Quanting

(Department of Physics, Guangzhou Teachers' College, Guangzhou 510400)

N. Granpayeh P. L. Chu

(School of Electrical Engineering, University of NSW, Australia)

(Received 12 May 1994; revised 15 July 1994)

Abstract In this paper, the temperature dependence of the gain in Er-doped fiber amplifiers is discussed and a mathematical model to explain the dependence is presented. The model is based on the assumption that temperature affects the emission and absorption cross sections of the fiber due to redistribution of dopant concentrations in the Stark energy levels of the ground and excited states. The results from the model agrees well with measurement results.

Key words fiber amplifier, gain, emission cross section, absorption cross section.