

# 温度对 L 波段 EDFA 增益斜率影响的实验研究

胡永刚, 义理林, 陈险峰

(上海交通大学, 上海 200240)

**摘要:**实用的 L 波段 EDFA(掺铒光纤放大器)常采用多段铒纤和多泵浦的复杂结构。对一种复杂结构的 L 波段 EDFA 的温度特性进行了实验研究,发现在不同的输入光功率下,L 波段短波侧(约 1 570~1 582 nm)的增益谱可按相反的方式随温度而变化,并从理论上解释了此现象。实验结果表明,铒纤的温度和增益斜率之间仍然存在很好的线性关系。控制铒纤温度就可以调整 L 波段 EDFA 的增益斜率,获得平坦的增益。

**关键词:**L 波段;掺铒光纤放大器;增益斜率;温度

中图分类号:TN722.7

文献标志码:A

文章编号:1005-8788(2012)03-0062-03

## Experimental investigations of temperature-dependent characteristics of L-band EDFA gain-tilt

Hu Yonggang, Yi Lilin, Chen Xianfeng

(Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** Practical L-band Erbium-Doped Fiber Amplifiers (EDFA) often adopt multi-stage Erbium-doped fiber and multi-pump lasers. In this paper, the temperature characteristic of an L-band EDFA with such a complex configuration is experimentally investigated. It is found that the gain spectra of the short-wavelength (about 1 570~1 582 nm) side of the L-band change with temperature in a reverse direction, which is theoretically explained. The experimental results show that there is still a good linear relationship between the Er-doped fiber temperature and the L-band EDFA gain tilt. Thus, the gain tilt of L-band EDFA can be adjusted by controlling the fiber temperature so as to achieve flattened gain.

**Key words:** L-Band; EDFA; gain-tilt; temperature

## 0 引言

在 DWDM(密集波分复用)传输系统中,EDFA(掺铒光纤放大器)的增益平坦度和增益斜率是衡量光纤放大器性能的重要指标。因为铒纤本身不具备平坦的增益特性,目前通常使用 GFF(增益平坦滤波器)对增益谱的形状进行“整形”,以得到所需的增益平坦度和增益斜率。然而,仅仅使用 GFF 只能在固定的工作状态下获得平坦的增益,当增益和输入信号功率发生变化时,EDFA 中粒子反转水平随之发生变化,增益斜率和平坦度不可避免地要发生改变,表现出 EDFA 固有的 DGT(动态增益斜率)特性;同样,当温度变化时,铒离子的吸收、发射截面也将发生相应的变化,引起增益斜率和平坦度的变化<sup>[1-4]</sup>。为使 EDFA 在增益和环境温度发生变化的情况下保持良好的增益平坦度,必须对 DGT 和增益的温度相关性进行相应的补偿。

对 L 波段的 EDFA,因其平均粒子反转水平较低,增益和增益斜率随温度的变化比 C 波段要大得多,掌握其变化规律并进行相应的补偿是非常重要的。F. A. Flood<sup>[5]</sup>详细研究了温度对掺铒硅基铒

纤 L 波段增益产生的影响,结果表明:在整个 L 波段内,无论是采用 980 nm 还是 1 480 nm 泵浦,各个波长处的增益几乎都随温度的升高而减小。不过上述结论是在同向泵浦和单段铒纤的情况下得到的,并且使用的样品为低掺杂浓度的掺铒硅基铒纤。在目前商用的 L 波段 EDFA 中,普遍使用了复杂组分的高掺杂浓度的铒纤,并且采用多段铒纤和多泵浦的结构,对此情况下增益的温度特性尚未进行详细的研究。本文对一种采用多段铒纤和多泵浦结构的商用 L 波段 EDFA 增益的温度特性进行了理论分析和实验研究。

## 1 L 波段 EDFA 增益的温度相关性理论分析

在忽略非均匀加宽的情况下,EDFA 的增益可表述为<sup>[6]</sup>

$$G(\lambda) = \exp\{\Gamma \cdot L[\sigma_c(\lambda) \cdot \bar{n}_2 - \sigma_a(\lambda) \cdot \bar{n}_1]\}, \quad (1)$$

式中, $\sigma_a(\lambda)$ 和 $\sigma_c(\lambda)$ 分别为在波长 $\lambda$ 处的吸收截面和发射截面; $\bar{n}_1$ 和 $\bar{n}_2$ 分别为基态和激发态的平均粒子数密度; $\Gamma$ 为交叠因子; $L$ 为铒纤长度。由式(1)可知,在 $\sigma_a$ 和 $\sigma_c$ 不变的情况下,当铒纤输入功率或者

收稿日期:2012-02-06

作者简介:胡永刚(1980-),男,甘肃宁县人,硕士,主要从事光纤放大器、光纤通信有源器件及其应用研究。

增益改变时,  $\bar{n}_1$  和  $\bar{n}_2$  通常会发生改变, 铒纤的增益谱形状也会发生相应的改变, 导致 DGT 的产生; 另一方面, 即使铒纤输入功率和泵浦功率不变, 在温度发生变化时, 由于  $\sigma_a$  和  $\sigma_e$  不仅是波长的函数, 而且还和温度相关, 使得 EDFA 的增益也和温度相关。

$\sigma_a$  和  $\sigma_e$  的温度相关性可解释如下: 在铒纤中, 无论基态和激发态都会在晶格场的作用下发生斯塔克劈裂, 产生一系列称为斯塔克能级的子能级。平衡态时, 基态或者激发态的铒粒子在各个斯塔克能级的占据几率服从玻耳兹曼分布

$$P(E_2)/P(E_1) = e^{(E_1-E_2)/kT}, \quad (2)$$

式中,  $P(E_1)$  和  $P(E_2)$  分别为热平衡时  $E_1$  和  $E_2$  能级处占据几率;  $k$  为玻耳兹曼常数;  $T$  为绝对温度。 $\sigma_a$  和  $\sigma_e$  与铒离子处于这些斯塔克能级的几率有关, 而几率又依赖于温度, 由此导致铒纤增益的温度相关性。通常实验测得的  $\sigma_a(\lambda)$  和  $\sigma_e(\lambda)$  谱一方面反映了基态和激发态内各个斯塔克能级的位置; 另一方面反映了给定温度下基态和激发态内粒子数的分布。在我们实验的温度范围内, 可认为斯塔克能级的位置与温度无关, 而温度通过改变粒子数分布几率来影响  $\sigma_a$  和  $\sigma_e$ 。

图 1 所示为室温时 OFS 公司的 LRL 型铒纤的  $\sigma_a$  和  $\sigma_e$  与波长的关系。根据铒纤的吸收谱和荧光谱, 对  $\sigma_a$  和  $\sigma_e$  随温度的变化特性已进行了详细的研究<sup>[4,7,8]</sup>, 其两个典型的特征如下: (1) 在 1 530 nm 附近,  $\sigma_a$  和  $\sigma_e$  的峰值随温度的升高而下降; (2) 在 1 560 nm 附近,  $\sigma_a$  和  $\sigma_e$  的值随温度的升高而有所增大, 这种反常的增大可从 1 550 nm 附近延续到 1 580 nm 附近。

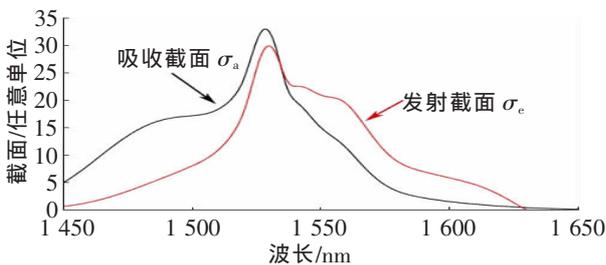


图 1 室温时 OFS 公司的 LRL 型铒纤的  $\sigma_a$  和  $\sigma_e$  与波长的关系

在 1 530~1 560 nm 之间, 因为各个斯塔克能级间由热加宽而发生强的交叠,  $\sigma_a$  和  $\sigma_e$  随温度的变化关系非常复杂, 从而导致 C 波段的增益谱呈现出复杂的变化方式, 并且与铒纤的基质成分和饱和程度密切相关<sup>[5]</sup>。在 1 560~1 580 nm 之间, 由于  $\sigma_a$  和  $\sigma_e$  随温度升高而产生反常的增大, 即当  $T_1 > T_2$  时,

$\sigma_e(T_1) > \sigma_e(T_2), \sigma_a(T_1) > \sigma_a(T_2)$ 。从式(1)不难看出, 若粒子反转程度较低,  $\bar{n}_2$  较小, L 波段中的 1 570~1 580 nm 附近增益可能随温度的升高而增大; 反之, 在饱和程度较高, 粒子反转程度较低时, 增益出现相反的变化。因此, 在此波长范围内, 铒纤增益的温度特性与饱和程度密切相关, 增益随温度的变化可出现相反的变化趋势, 此现象也被我们后面的实验所证实。而在更长波长处, 当温度升高时, 基态和激发态中处于能量较低的子能级上的粒子数减少, 这就增加了长波长处的吸收并减少了发射, 相应的  $\sigma_a$  增大而  $\sigma_e$  却减小, 所以在  $>1 580$  nm 的长波段, 增益随温度的增加是单调递减的。

## 2 L 波段 EDFA 的温度特性实验与分析

图 2 所示为实验所使用的 EDFA 结构。采用 980 和 1 480 nm 两级泵浦, 所用铒纤为 OFS 公司的 LRL 型铒纤, 两段铒纤的长度分别为 13 m(铒纤 1) 和 15 m(铒纤 2), 两段铒纤均盘绕在一个恒温盒中, 该恒温盒可将铒纤温度控制在室温至 80 °C 之间。为使 L 波段的增益平坦, 并抑制第 1 段铒纤产生的 C 波段 ASE(自发放大辐射), 两段铒纤中加入了 GFF。两端铒纤间的 ISO(隔离器)用于消除第 2 段铒纤产生的反向 ASE。

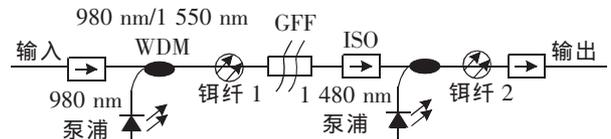


图 2 L 波段 EDFA 光路结构图

图 3 所示为总输入功率为 -2 dBm 时不同温度下的增益谱。图中除给出了测量的增益谱以外, 还给出了各个温度下最小二乘法拟合的增益(直线), 以便于观察增益斜率的变化。L 波段 EDFA 在 35 °C 时平均增益为 24 dB, 980 和 1 480 nm 泵浦的功率分别为 210 和 176 mW。由图 3 可知, 在 1 582 nm 两侧, 增益随温度的变化方式相反。在 L 波段两端按相反趋势变化的增益使得增益斜率随温度有较大

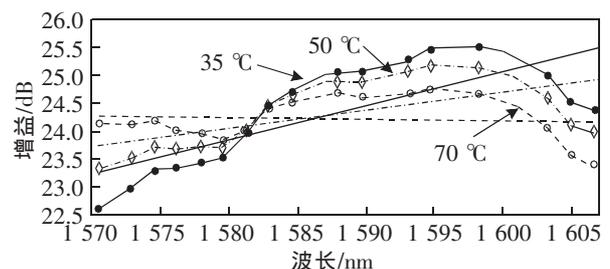


图 3 总输入功率为 -2 dBm 时不同温度下的增益谱

的变化,当从 35 °C 升温到 70 °C 时,增益斜率从正值 (2.2 dB) 变为负值,但平均增益仅减小了 0.3 dB。

为考察不同工作条件下增益斜率随温度的变化趋势,我们把总输入功率调整为 -20 dBm,但仍保持 35 °C 时的平均增益为 24 dB,此时 980 和 1480 nm 泵浦的功率分别变为 167 和 60 mW。测试结果如图 4 所示,在整个 L 波段,增益基本上随温度升高而减小,与高功率输入时(图 3 中)1570~1580 nm 之间增益的变化趋势相反。由此可见,在 1570~1580 nm 之间,L 波段 EDFA 在高饱和情况下,增益随温度的升高而增大;而在反转程度较高时,增益出现相反的变化。

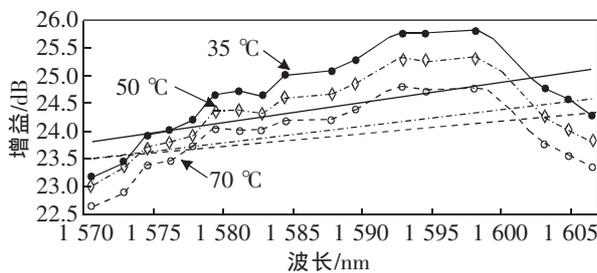


图 4 总输入功率为 -20 dBm 时不同温度下的增益谱

尽管在不同工作状态下,L 波段 EDFA 在 1570~1580 nm 之间的增益谱随温度的变化方式不尽相同,但在整个 L 波段的大部分波长范围内,其增益总是随温度的升高而减小。由图 3 和图 4 可知,从整个 L 波段来看,增益斜率总是随温度的升高而减小。图 5 给出了两个不同输入功率下增益斜率与温度的变化关系,其中“□”和“○”表示实验测量点,它们可用线性关系很好地进行拟合。根据此线性关系,对钕纤的温度进行控制就可方便地调整放大器的增益斜率,并用于补偿 DGT。

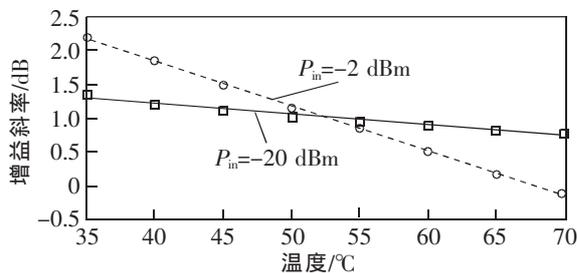


图 5 不同输入功率下增益斜率与温度的关系

### 3 结 论

L 波段 EDFA 中钕纤的温度对增益谱有明显的影响。文献[5]中对单段钕纤的实验结果表明:无论是在高、中和低的饱和程度下,各个波长处的增益几乎都随温度的升高而减小。但我们却发现

在 1570~1582 nm 之间,根据钕纤饱和程度的不同,增益随温度升高可能出现相反的变化方式。在较高的饱和程度下,温度变化时,1582 nm 两侧的增益的变化趋势相反,这使得高饱和程度下增益斜率对温度的变化更加敏感。

尽管 L 波段 EDFA 增益谱随温度的变化方式比较复杂,但是在整个 L 波段的大部分波长范围内,增益总是随温度的升高而减小,所以当温度升高时,其增益斜率总是单调变化,且增益斜率与温度之间的关系可很好地用线性关系进行拟合。利用此特性对钕纤温度进行控制,可在一定范围内调整 L 波段 EDFA 的增益斜率或补偿 DGT,以满足 DWDM 系统传输的要求。

#### 参考文献:

- [1] Millar C A, Whitley T J, Fleming S C. Thermal properties of an erbium-doped fiber amplifier [J]. Proc Inst Elect Eng, 1990,137(3):155-162.
- [2] Yamada M, Shimizu M, Horiguchi M, et al. Temperature dependence of signal gain in Er<sup>3+</sup>-doped optical fiber amplifiers [J]. IEEE J Quantum Electron, 1992, 28: 640-649.
- [3] Nakaji H, Ishizawa Y, Ohmura M, et al. A temperature-insensitive erbium-doped fiber amplifier for terrestrial wavelength-division-multiplexing systems [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2003, 15(11): 1522-1524.
- [4] Bolshtyansky M, Wysocki P, Conti N. Model of temperature dependence for gain shape of Erbium-doped fiber amplifier [J]. J Lightwave Technol, 2000, 18: 1533-1540.
- [5] Flood F A. Comparison of temperature dependence in C-band and L-band EDFAs [J]. J Lightwave Technol, 2001,19:527-535.
- [6] Desurvire E. Analysis of noise figure spectral distribution in erbium doped fiber amplifiers pumped near 980 and 1480 nm [J]. Appl Opt, 1990,29: 3118-3125.
- [7] Kakui M, Ishikawa S, Endo S, et al. Dynamic-gain-tilt-free long-wavelength band Erbium doped fiber amplifiers utilizing temperature dependent characteristics of gain spectrum [A]. OFC 2000 [C]. Baltimore, USA:OSA,2000. WA3.
- [8] Kemtchou J, Duhamel M, Chatton F, et al. Comparison of temperature dependences of absorption and emission cross-sections in different glass hosts of erbium-doped fibers [A]. Proc OAA 1996 [C]. Monterey, USA: OSA,1996. FD2.