

文章编号: 0258-7025(2004)06-0705-04

共掺铝的掺铒光纤放大器的光谱特性

傅永军, 简 伟, 简水生

(北京交通大学光波技术研究所, 北京 100044)

摘要 用 Stark 能级分裂的变化分析了掺铝改变掺铒光纤放大器(EDFA)光谱特性的原理,并用改进型化学气相沉积法(MCVD)结合溶液浸泡掺杂法制作了采用不同掺铝比例的掺铒光纤,测试了用这几种光纤制作的放大器的自发辐射谱,得出掺铝浓度的提高使荧光谱的峰值往短波长移动,与 Stark 能级分裂理论分析得到的结果相一致。同时采用截断法测试了两种不同掺铝浓度的掺铒光纤的吸收谱,实验结果表明掺铒光纤中增加铝的含量将提高铒离子浓度,并提高掺铒光纤的吸收系数,减短掺铒光纤放大器中的掺铒光纤长度。高掺铝掺铒光纤放大器具有更宽更平坦的增益谱线,可以适用长距离波分复用(WDM)系统。

关键词 光纤通信技术;共掺铝掺铒光纤放大器;增益谱平坦;Stark 能级

中图分类号 TN 253;TN 929.11 **文献标识码** A

Spectral Characteristic of Alumina Codoping Erbium Doped Fiber Amplifier

FU Yong-jun, JIAN Wei, JIAN Shui-sheng

(Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract Alumina codoping can change the spectra of Er doped fiber amplifier (EDFA), which can be analyzed by Stark energy level splitting theory. Several types of EDFs with different alumina concentration were fabricated by modified chemical vapor deposition (MCVD) and solution doping method, and the fluorescence spectra of the alumina codoping EDF amplifier was explored. The investigation showed that alumina codoping result in a shift of fluorescence toward shorter wavelength. The absorption coefficients of EDFs with different alumina doping concentration was measured by cutoff method, and the result demonstrate that increasing the alumina concentration in EDF will increase the concentration of Er, which can improve the absorption coefficients of EDF and shorten the length of EDF in EDFA. High alumina codoping EDFA have wider and flatter gain spectra, which can be used in long haul wavelength division multiplexing (WDM) system.

Key words optical fiber communication technique; alumina codoping erbium doped fiber amplifier; gain spectra flattening; Stark energy level

1 引 言

掺铒光纤放大器(EDFA)由于在 $1.55 \mu\text{m}$ 附近有相当宽的增益谱,正好在光纤的最低损耗窗口,因此作为长距离光纤通信的中继器得到广泛应用^[1~3]。掺铒光纤(EDF)的设计对于实现宽带平坦的增益是非常重要的^[4],特别是掺杂的比例决定了

自发发射谱的平坦性。根据二能级分析模型,为了实现较高的增益效率,要求掺铒光纤具有小的模场直径和高的中心折射率^[5],常通过共掺锗或共掺铝来提高中心折射率。本文通过 Stark 能级分裂的变化^[6],分析了掺锗和掺铝掺铒光纤放大器的光谱特性,并制作了不同掺铝比例的掺铒光纤放大器,其研究方法和结论对于掺铒光纤的制作很有意义。

收稿日期:2003-01-06;收到修改稿日期:2003-04-14

基金项目:国家 863 计划(编号:2001AA312230)资助项目。

作者简介:傅永军(1977—),男,浙江诸暨人,北京交通大学光波技术研究所博士研究生,主要从事光纤通信、特种光纤等方面的研究。E-mail: youth@263.net

2 理论分析

为了分析工作在 $1.54 \mu\text{m}$ 附近的掺铒光纤激光器和放大器,研究掺铒玻璃宿主中多重态 ${}^4I_{13/2}$ 和 ${}^4I_{15/2}$ 之间的跃迁是非常有必要的。采用 980 nm 抽运光时,掺铒光纤激光器和放大器系统属于三能级系统,但由于粒子在 ${}^4I_{11/2}$ 能级上寿命很短,会很快地无辐射地弛豫到亚稳态 ${}^4I_{13/2}$ 上,因此本文使用二能级模型分析 Stark 分裂,即只考虑 ${}^4I_{13/2}$ 和 ${}^4I_{15/2}$ 之间的跃迁。由于在玻璃或晶体宿主中,本地电荷分布会产生一个永久性的电场,称为晶体场或配位场,它的存在会引起 Stark 能级分裂,不同的宿主会使 Stark 子能级的能量有很大的不同。图 1(a), (b) 分别是 $\text{GeO}_2:\text{SiO}_2:\text{Er}$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{GeO}_2:\text{SiO}_2:\text{Er}$ 中的 Stark 能级的能量图。在 Stark 分裂作用下, ${}^4I_{13/2}$ 和 ${}^4I_{15/2}$ 成为具有多个子能级的多重态,布居数在子能级上不是按等概率分布,而是在热效应作用下,布居数分布为一个常数,并服从玻尔兹曼分布。根据二能级模型,假定基态 ${}^4I_{15/2}$ 和激发态 ${}^4I_{13/2}$ 上的布居数分别为 N_1 和 N_2 , $N_1 + N_2 = N_{\text{total}}$ 。多重态中的子能级用下标 j, k 表示, $j = 1, 2, \dots, g_1$, $k = 1, 2, \dots, g_2$, g_1 和 g_2 分别为 ${}^4I_{15/2}$ 和 ${}^4I_{13/2}$ 的子能级数。子能级的布居数用 N_{mn} ($n = 1, 2; m = j, k$) 来表示,根据文献 [6], 得到

$$N_{mn} = \frac{\exp[-(E_m - E_1)/k_B T]}{\sum_{m=1}^{g_n} \exp[-(E_m - E_1)/k_B T]} N_n = p_{mn} N_n$$

表 1 在共掺锗和共掺锗铝的掺铒光纤的 ${}^4I_{13/2}$ 上各个子能级的占据概率

Table 1 Occupation probability of ${}^4I_{13/2}$ Stark component on $\text{GeO}_2:\text{SiO}_2:\text{Er}$ and $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{GeO}_2:\text{SiO}_2:\text{Er}$ glass fiber

Energy of ${}^4I_{13/2}$ Stark component / cm^{-1} ($\text{GeO}_2:\text{SiO}_2:\text{Er}$)	6515	6550	6560	6585	6820
Occupation probability $p_{2m} / \%$	27.9	23.5	22.4	19.8	6.3
Energy of ${}^4I_{13/2}$ Stark component / cm^{-1} ($\text{Al}_2\text{O}_3:\text{GeO}_2:\text{SiO}_2:\text{Er}$)	6540~6548	6644	6711	6770	
Occupation probability $p_{2m} / \%$	41.4~42.5	25.8	18.6	14	

根据玻尔兹曼分布,布居数在最低 Stark 能级的概率最大,使铒离子的自发发射谱的峰值位置基本上对应于 ${}^4I_{13/2}$ 的最低 Stark 能级到 ${}^4I_{15/2}$ 的最低 Stark 能级的跃迁。图 1(a) 是锗共掺的掺铒光纤的 Stark 能级能量图,荧光谱的峰值位置在 1535 nm 附近,同时各个 Stark 能级之间的差值比较小,导致谱线比较集中,荧光谱较窄。图 1(b) 是铝共掺的掺铒光纤能级图 ($\text{Al}_2\text{O}_3 \%$ = 7.5 mol-%),掺铝之后,使 ${}^4I_{13/2}$ 最低能级能量增加,从 6515 cm^{-1} 变为 6540 cm^{-1} ,使高掺铝之后的荧光谱的峰值移到了

这里 p_{mn} 就是玻尔兹曼分布, k_B 为玻尔兹曼常数 ($k_B = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$), E_m, E_1 分别为各个子能级能量和多重态中最低能级的能量。

根据玻尔兹曼分布,在 $T = 295 \text{ K}$ 时,布居数在 $\text{GeO}_2:\text{SiO}_2:\text{Er}$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{GeO}_2:\text{SiO}_2:\text{Er}$ (高掺铝, $\text{Al}_2\text{O}_3 \%$ = 7.5 mol-%^[7]) 两种光纤的 ${}^4I_{13/2}$ 能级各个子能级上的占据概率见表 1。

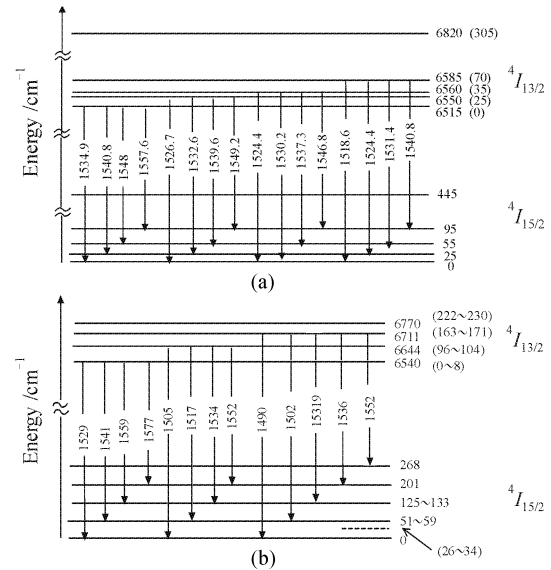


图 1 共掺锗(a)和共掺锗铝(b)掺铒光纤的 ${}^4I_{15/2}$ 和 ${}^4I_{13/2}$ Stark 能级能量图

Fig. 1 Energy diagram of the Stark component of ${}^4I_{15/2}$ and ${}^4I_{13/2}$ in $\text{GeO}_2:\text{SiO}_2:\text{Er}$ glass fiber (a) and in $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{GeO}_2:\text{SiO}_2:\text{Er}$ glass fiber (b)

1529 nm 。研究表明由于 GeO_2 和 SiO_2 的性质相似,因此掺锗不改变铒玻璃的配位场,只起到改变折射率的作用,此时铒的能级结构与不掺锗时相同。当从不掺铝时的能级图图 1(a) 变化到高掺铝的能级图图 1(b) 的过程中,掺铝的浓度逐渐提高对配位场的作用越强,使激发态的最低能级的能量逐渐升高,辐射峰值从 1535 nm 逐渐往短波长移,此结论在实验中得到了验证。不掺铝时,自发辐射谱有两个峰值,同时也可认为在 1540 nm 附近有一个低洼处,随着掺铝浓度的提高,对应此处 1540 nm 附近

的激光跃迁增强,使低洼处上抬,从而使荧光谱随着铝浓度的提高而变得平坦。掺铝的另一个作用,就是使 Stark 能级之间的能量差增加,荧光谱变得更宽。图 2 是典型的掺锗和掺铝 $\text{SiO}_2:\text{Er}$ 光纤的荧光谱。

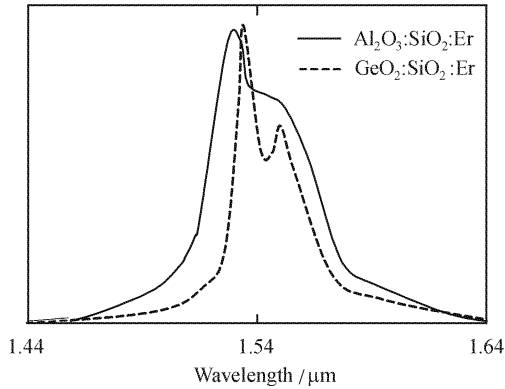


图 2 共掺铝和共掺锗掺铒光纤的荧光谱

Fig. 2 Fluorescence spectra of $\text{SiO}_2:\text{Er}$ glass codopants: alumina (Al_2O_3), germania (GeO_2)

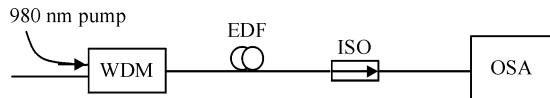


图 3 EDFA 的荧光谱测试系统

Fig. 3 Measurement setup of fluorescence spectra of EDFA

3 铝离子浓度对荧光谱的影响

采用改进型化学气相沉积法(MCVD)结合溶液掺杂法,试制了不同掺铝浓度的掺铒光纤,对它们的光谱特性进行了测试。

Er1, Er2, Er3 分别是低浓度(约 0.15 mol-%), 中等浓度(约 1.5 mol-%)和高浓度掺铝(约 5 mol-%)的自制掺铒光纤,芯径约为 $4\ \mu\text{m}$,数值孔径为 0.23。为了便于比较,其中配制溶液的铒离子浓度一致。采用 980 nm 的抽运光源,铒光纤长度分别是 22 m, 18 m 和 15 m,用光谱仪进行测试。测试系统如图 3 所示,抽运功率为 20 dBm,测试结果见图 4。

它们的峰值波长分别为: 1534.840 nm, 1533.017 nm, 1530.980 nm, 即当掺铝浓度逐渐增加的时候,荧光谱的峰值波长向短波长移动,且从 1540~1560 nm 之间的谱线变得更平坦。如图 4 (a)中低掺铝时,不平坦度达到了 9 dB,在图 4(b)中

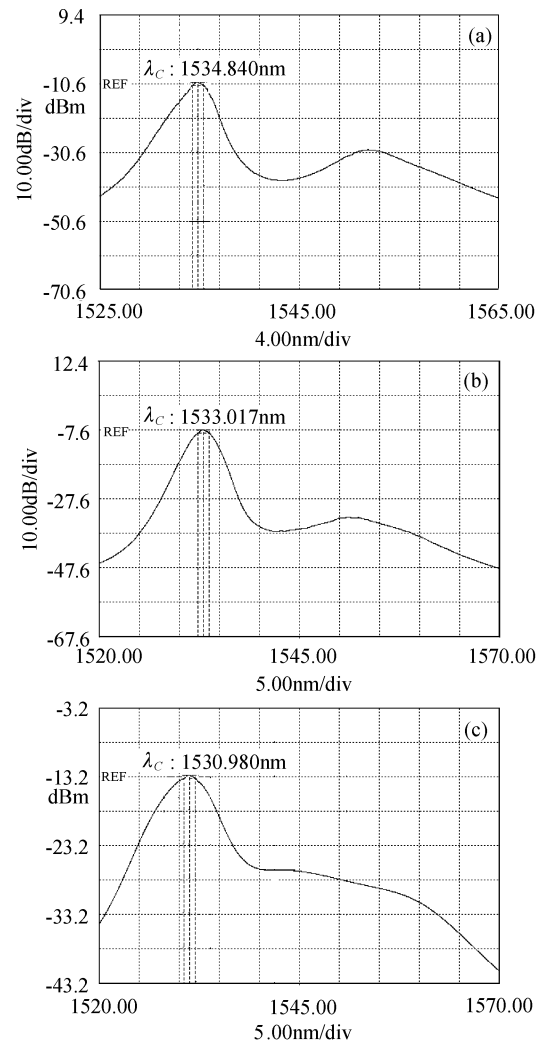


图 4 低浓度(a),中等浓度(b)和高浓度(c)掺铝掺铒光纤放大器的荧光谱

Fig. 4 Fluorescence spectra of low (a), middle (b) and high (c) alumina concentration EDFA

提高掺铝比例,不平坦度改善为 3.4 dB,而图 4(c)中 1540 nm 附近处的低洼完全消失,基本实现了荧光谱的平坦,此时 5 mol-% 的掺铝浓度有点偏高,多次实验后发现掺铝浓度应在 3~4 mol-% 之间比较合适。荧光谱的不平坦对应着不同波长处信号增益的不同。下面利用 Er2 制作的放大器进行了放大性能的测试。在 1533 nm 处(最高峰值位置),输入信号 -15 dBm,输出为 10 dBm,增益 25 dB。在 1543 nm 处(最低位置),同样输入时,输出为 3 dBm,增益为 18 dB。在 1551.5 nm 处(次高峰位置),同样输入时,输出为 5.8 dBm,增益为 20.8 dB。不同波长处增益具有明显的不同,增益随波长的变化与荧光谱的变化是一致的。

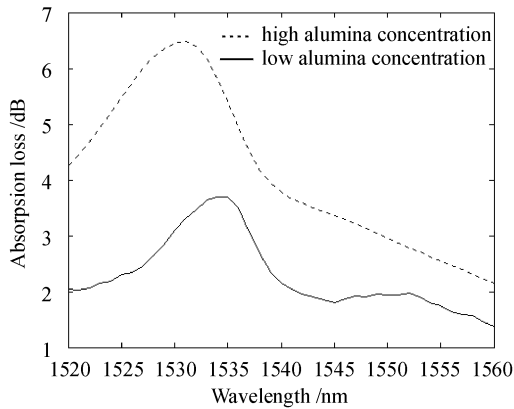


图 5 不同掺铝浓度掺铒光纤的吸收谱

Fig. 5 Absorption loss of EDFA with high alumina concentration and low alumina concentration

4 铝离子浓度对掺铒光纤吸收系数的影响

采用剪断法测试了 Er1 和 Er3 这两种光纤的吸收系数,掺铒光纤长度为 2 m,采用小信号测试,这时放大自发辐射很小,可以忽略,认为光纤只有吸收没有辐射,即 $D = (N_2 - N_1) / N_{\text{total}} = -1$ 。图 5 是这两种光纤的吸收系数,根据 McCumber 理论 $\sigma_e(\nu) = \sigma_a(\nu) \exp\left(\frac{\epsilon - h\nu}{k_B T}\right)$; $\sigma_e(\nu)$, $\sigma_a(\nu)$ 分别为铒离子的吸收和发射截面积,可根据实验测得的吸收截面积计算发射截面积; ϵ 为依赖温度的激发态能量, ν 为激光跃迁频率, T 为温度;根据测得的图 5 中的吸收系数,并根据 McCumber 理论计算,在高掺铝时得到 1540~1560 nm 平坦的荧光谱,而在低掺铝时得到双峰。在采用溶液浸泡掺杂法制作掺铒光纤的过程中,铒离子浓度相同,而铝离子浓度不同时,发现吸收系数差别很大,高掺铝的情况下,使吸收系数大大提高,而在波导结构相同的情况下,吸收系数的提高表明了铒离子浓度的提高。研究表明由于在玻璃结构中,以四面体结构为基本单元,它们之间通过四面体角上的氧原子(称为桥接的氧原子)相联,组成网络状结构,而铒离子由于体积大,很难并入网络状

结构中。而加入碱性离子之后,可以使桥接的氧原子变成非桥接的,从而使得网络结构变得疏松,这样就易于铒离子进入,从而可以大大提高铒离子的浓度,提高吸收系数,使用较短的光纤就能实现较高的效率。

5 结 论

通过对共掺铝的掺铒光纤放大器光谱特性的研究表明,掺铝可以提高铒离子在掺铒光纤中的浓度,可以使荧光谱的峰值波长往短波长移动,使增益谱更宽、更平坦,有利于在长距离波分复用系统中的应用。利用 Stark 能级的分裂能够很好地解释掺铝对掺铒光纤放大器光谱特性的影响,高掺铝掺铒光纤放大器能够实现很宽的、更加平坦的增益,是优化掺铒光纤特性的最好选择。

参 考 文 献

- 1 N. Takeda, H. Taga, K. Imai *et al.*. Forty WDM 2.5-Gbit/s transmission over 12000 km using widely gain-flattened low-noise 980-nm pumped EDFAs [C]. Optical Fiber Communication Conference and Exhibit, 1998, OFC'98, Technical Digest, 22~27 Feb. 1998, 54~55
- 2 S. Yoshida, S. Kuwano, N. Takachio *et al.*. 10 Gbit/s \times 10 channel WDM transmission experiment over 1200 km with repeater spacing of 100 km without gain equalization or pre-emphasis [C]. Tech. Dig. OFC'96, San Jose, California, Feb. 1996, 19~21
- 3 Yan Liu, Yongjun Fu, Zhongwei Tan *et al.*. Dispersion compensation of 2×10 Gb/s 1000 km WDM system using chirped fiber Bragg gratings [C]. APOC'02, SPIE, 2002, 4904:75~79
- 4 Meng Hongyun, Zhao Chunliu, Yang Shiquan *et al.*. Gain-flattening of an erbium-doped fiber amplifier using a fiber loop mirror [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(9):805~807
蒙红云,赵春柳,杨石泉等.基于光纤环形镜的掺铒光纤放大器增益平坦化[J]. *中国激光*, 2002, **A29**:805~807
- 5 C. Randy Giles, Emmanuel Desurvire. Modeling erbium-doped fiber amplifier [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1991, **9**(2):271~282
- 6 E. Desurvire. Erbium-Doped Fiber Amplifier: Principles and Applications [M]. New York: Wiley, 1994
- 7 E. Desurvire, J. R. Simpson. Evaluation of $^4I_{15/2}$ and $^4I_{13/2}$ Stark-level energies in erbium-doped aluminosilicate glass fibers [J]. *Opt. Lett.* - 1990, **15**(10):547~549