

高折射率纤芯掺铒布拉格光纤放大器研究

孙婷婷¹ 王志² 赵立龙¹

(¹南京信息工程大学数理学院, 江苏 南京 210044)
²南开大学现代光学研究所, 天津 300071

摘要 对高折射率纤芯掺铒布拉格光纤放大器特性进行实验研究, 测量了正向抽运、反向抽运方式下布拉格掺铒光纤放大器的小信号增益和噪声系数。实验结果表明, 与普通掺铒光纤放大器相比, 二者的自发辐射谱形状基本相同, 但是掺铒布拉格光纤放大器的效率较低。通过对光纤模场的理论计算, 分析了原因所在并提出相应的改进措施。此外, 对两种光纤放大器的饱和增益特性进行了比较。当普通掺铒光纤放大器和布拉格掺铒光纤放大器工作在相同增益水平下时, 与前者比, 布拉格掺铒光纤放大器具有更大的输入信号动态范围, 可以应用于放大器的增益控制领域。

关键词 光纤光学; 光纤放大器; 布拉格光纤; 增益

中图分类号 TN253

OCIS 060.4005 060.2320 060.2410

文献标识码 A

Performance Studies on Er³⁺-Doped Amplifier Based on Bragg Fiber with High Index Core

Sun Tingting¹ Wang Zhi² Zhao Lilong¹

(¹ College of Math & Physics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China
² Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract Characteristics of Er³⁺-doped amplifier based on Bragg fiber with high index core are investigated. Small signal gain and noise figure are measured for forward pump configuration and backward pump configuration. The results show that, compared with conventional Er³⁺-doped fiber amplifier, Bragg fiber amplifier has similar amplified spontaneous emission but lower gain. With the simulation on mode field of doped Bragg fiber, the result is discussed and improving method is proposed. Moreover, characteristics of saturated gain are also studied. It is shown that Bragg fiber amplifier has larger input-dynamic-range and has potential application in automatic gain control.

Key words fiber optics; fiber amplifier; Bragg fiber; gain

1 引言

1978年 Pochi Yeht 等^[1]提出了布拉格(Bragg)光纤的概念, 这种光纤沿径向存在周期性的折射率分布, 在某些条件下可以将其近似看作一维带隙型光子晶体光纤。人们对它开展了理论和实验的研究, 并且发现了一些新的特征。但是, 由于布拉格光纤大多为同轴的空心结构, 制作起来并不容易, 所以限制了这类光纤的发展。最近, Monsoriu 等^[2]提出了一种高折射率芯的布拉格光纤, 其纤芯由高折射率材料构成, 大大降低了制作难度。通过改变光纤几何结构和折射率分布, 可以实现对传导模式和色散参量的控制。相对于普通光纤, 布拉格光纤具有更多的可控参量, 并且因为其相对简单的构造形式而降低了制作的难度, 在光通信和光电子器件方面具有极大的应用潜力^[3~11]。

收稿日期: 2010-05-31; 收到修改稿日期: 2010-07-09

基金项目: 南京信息工程大学科研基金(20080287, S8109005001)和江苏省高校自然科学研究计划项目(09KJB170003)资助课题。

作者简介: 孙婷婷(1981—), 女, 博士, 讲师, 主要从事光电子和光纤器件等方面的研究。

E-mail: nksuntingting@gmail.com

本文讨论布拉格光纤在掺稀土光纤激光器件方面的应用,对高折射率纤芯掺铒布拉格光纤放大器进行实验研究,测量了正向、反向抽运方式下布拉格掺铒光纤放大器的小信号增益和噪声系数。此外通过对光纤传导模式的计算,提出了光纤制作方面的改进措施,从而进一步提高布拉格掺铒光纤放大器的效率。

2 掺铒布拉格光纤

实验中使用的折射率掺 Er^{3+} 布拉格光纤,是与武汉邮电科学研究院烽火科技集团合作拉制的。光纤由掺铒纤芯和高、低掺杂的折射率环构成,各部分参数和折射率分布见图 1。利用显微镜观察光纤的端面结构,如图 2 所示。图 2 中右侧的区域为光纤的横截面,灰色部分是光纤的外包层,由石英构成;在光纤的中心,可以清晰地看到三个白色圆环包围着的圆型亮斑,分别对应高折射率环和光纤的纤芯。使用 650~1750 nm 的超宽带连续光源,测量得到 40 m 光纤的透射谱,与普通掺铒光纤透射谱相似。

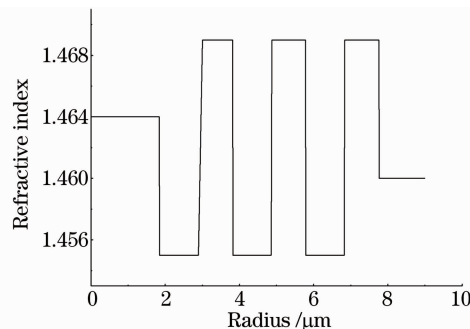


图 1 掺铒布拉格光纤的径向折射率分布

Fig. 1 Refractive index profile of Er^{3+} -doped Bragg fiber



图 2 显微镜下掺铒布拉格光纤的端面

Fig. 2 Cross section of Er^{3+} -doped Bragg fiber

3 实验装置及实验结果

利用实际制备的掺铒布拉格光纤搭建光纤放大器并对其性能进行测试。放大器分别采用前向、后向两种抽运方式,实验光路如图 3 所示。作为抽运的 1480 nm 半导体激光器输出功率为 100 mW,增益光纤为掺铒布拉格光纤,光路中的连接光纤为普通单模光纤。由于布拉格光纤为全固结构,所以很容易实现与单模光纤的熔接。信号源是 Santec 公司生产的可调谐激光器,波长调谐范围为 1530~1630 nm。通过选择波长和功率,可以得到稳定的小信号输出。实验中使用的布拉格光纤长度为 5 m。

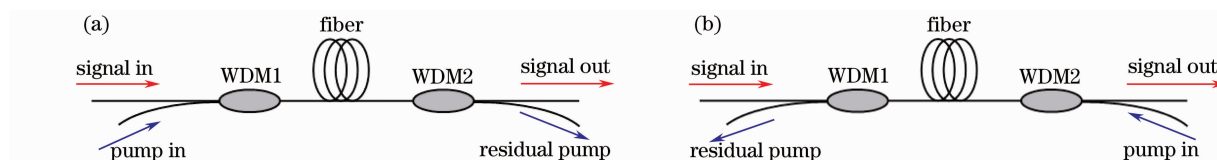


图 3 掺 Er^{3+} 布拉格光纤放大器实验装置。(a)前向抽运方式,(b)后向抽运方式

Fig. 3 Structure of Er^{3+} -doped Bragg fiber amplifier. (a) forward pumping, (b) backward pumping

调节输入信号光的波长并控制信号强度为 -36.3 dBm,连续变化输入信号的波长,测量得到掺 Er^{3+} 布拉格光纤放大器的小信号增益谱如图 4 所示,实心方块表示前向抽运方式,空心方块表示后向抽运方式。两种抽运方式下,增益峰值都位于 1533 nm 处,最大增益都小于 6 dB。在 1546~1560 nm 波长范围内,后向抽运增益略大于前向抽运增益,其他波长区域内两种抽运方式下的增益基本相同。当输入信号波长为 1550 nm 时,测量了前、后向抽运方式下的噪声系数,分别为 3.29 dB 和 4.76 dB。

图 5 是使用普通掺铒光纤作增益介质时测量得到的放大器增益谱,实验装置与图 3 相同,只是将增益光纤换成了普通掺铒光纤,长度仍然为 5 m。实心、空心的三角分别表示正向、反向抽运方式下放大器的增益。从图中看出,峰值增益仍然在 1533 nm 附近,最大增益大于 30 dB。在 1530~1565 nm 波长范围内,后向抽运方式下的增益明显大于前向抽运方式。调节信号光波长为 1550 nm,测得前、后向抽运方式下放大器的噪声系数分别为 9.95 dB 和 10.44 dB。测量得到的噪声系数要高于一般掺铒光纤放大器噪声系数水平,这是由于实验中作为输入信号的激光器线宽极窄,稍有变动就可能引起放大器噪声系数的升高。通过对比图 4,

5可以看出,两种光纤的增益谱形状基本相同,但是掺 Er^{3+} 布拉格光纤放大器的增益明显要低于普通掺铒光纤。出现这种状况的原因主要是由于布拉格光纤模场分布和掺杂区不一致所致。

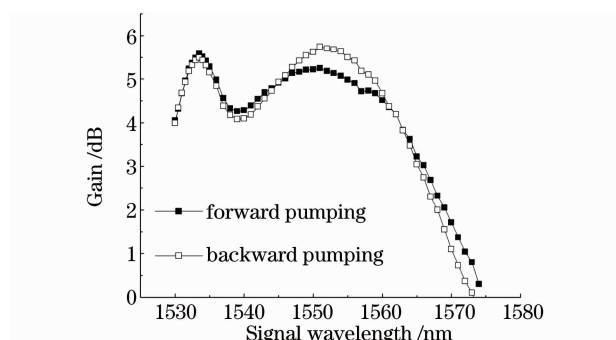


图4 掺铒布拉格光纤放大器增益谱

Fig. 4 Gain spectrum of Er^{3+} -doped Bragg fiber amplifier

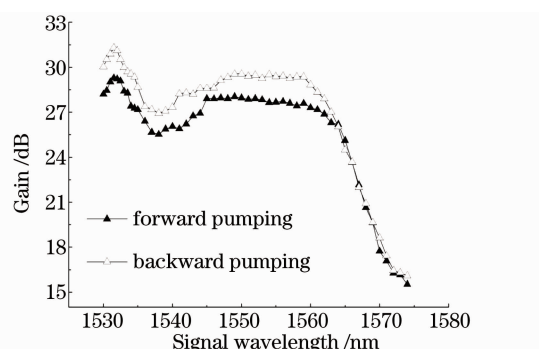


图5 普通掺铒光纤放大器增益谱

Fig. 5 Gain spectrum of conventional Er^{3+} -doped fiber amplifier

针对布拉格光纤放大器增益效率较低问题,分析了其中的原因。使用有限单元分析方法,计算了波长为1480 nm和1550 nm时,掺铒布拉格光纤的模场分布情况。光纤参数和折射率分布取图1数值,与实际光纤保持一致。由于两种波长条件下光纤模场分布相似,所以只给出波长为1480 nm的模式分布,如图6所示。其中箭头表示电场的方向,颜色表示能量分布,由深到浅依次降低。图6(a)、(b)为两个简并 HE_{11} 模的能量分布,电场方向互相垂直,(c)和(d)分别为 TE_{01} , TM_{01} 模式的能量分布图。从图中可以看出,由于光纤环状包层厚度可与纤芯相比拟,而且折射率差又很小,所以能量分布不是集中在纤芯里,而是已经扩展到纤芯周围的高折射率环中。可以近似地将这种情况看作由环状包层和纤芯构成了一个更大的纤芯,将能量约束在这个大纤芯里传输。由于在光路中我们使用了单模光纤作为连接光纤,所以光路中的传输模式主要为 HE_{11} 模。在此条件下,抽运光和信号光有相当部分的能量落在稀土掺杂区之外,造成了能量的损失,这也正是放大效率较低的原因所在。一般地,折射率环的厚度应小于纤芯直径,才能形成对光场的限制作用。计算表明,保持纤芯尺寸和折射率差不变,将光纤折射率环的厚度减小到 $0.15 \mu\text{m}$ 时,能量可以被很好地约束在纤芯中传输。所以布拉格掺杂光纤的性能是与其结构参数密切相关的,不仅依赖于模式能量的分布,而且与稀土掺杂物的分布也有很大的关系。在国外,折射率环厚度为 $0.15 \mu\text{m}$ 甚至更薄的布拉格光纤已经可以制作出来^[6],所以相信随着不断的

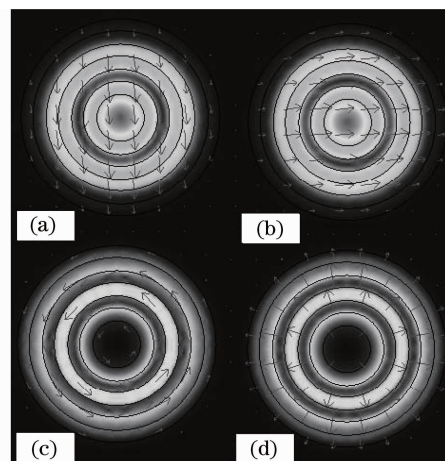


图6 掺铒布拉格光纤模场分布图。(a)~(d)分别为 HE_{11} , HE_{11} , TE_{01} 和 TM_{01} 模式

Fig. 6 Mode field distribution of Er^{3+} -doped Bragg fiber. (a)~(d) mode fields of HE_{11} , HE_{11} , TE_{01} and TM_{01}

技术进步,国内的光纤制作工艺也会有很大水平的提高。

此外,还研究了两种光纤放大器的饱和增益特性。图7为输入信号光波长为1550 nm时,两种掺铒光纤放大器的饱和增益特性曲线。三角和方块分别表示以普通掺铒光纤和掺铒布拉格光纤为增益光纤时的增益曲线,实心、空心分别表示前向抽运和后向抽运方式。可以看到,对于普通掺铒光纤,当输入信号功率为 -16 dBm 时,放大器增益减小3 dB;信号功率继续增大,增益降低速度加快,说明放大器已经达到饱和状态。而对于布拉格掺铒光纤放大器,输入信号功率从 -36.25 dBm 增加到 4.75 dBm 时,增益降低幅度小于2 dB。

令普通掺铒光纤放大器工作在低增益水平,发现当放大器峰值增益降低时,输入信号的动态范围增大。为比较相同增益条件下两种放大器的饱和增益特性,通过调整抽运功率,使得两放大器工作在相同的增益水平。在此条件下,仍然固定输入信号光波长为1550 nm,改变输入信号功率从 -30 dBm 增大到 10 dBm ,得

到两放大器的饱和增益特性曲线(放大器均采用前向抽运方式),如图8所示,其中空心圆点为普通掺铒光纤放大器增益曲线。当信号输入功率大于0 dBm时,增益降低3 dB以上。与同等峰值增益条件下布拉格掺铒光纤放大器的饱和增益特性相比(实心圆点),随信号功率的增加,普通掺铒光纤放大器增益下降速度要大于布拉格掺铒光纤放大器。这就表明,对于图7中的布拉格掺铒光纤放大器,输入信号动态范围的增大,不仅是低峰值增益的原因。由于其特殊的传导模式分布,使布拉格掺铒光纤放大器在增益控制方面表现出独特的优势。根据我们实验测量的数据,在输入信号功率在-36.25~4.75 dBm之间变化时,放大器增益上下浮动范围小于1 dB。

4 结 论

本文对高折射率纤芯掺铒布拉格光纤放大器进行实验研究,测量得到了同向抽运方式和反向抽运方式下布拉格掺铒光纤放大器的增益特性。与普通掺铒光纤放大器的结果相比,可以得到如下结论:1)二者的自发辐射谱形状基本相同,但是布拉格掺铒光纤放大器的效率较低。通过进一步的理论分析,后者的原因是模场分布与掺杂区不一致造成的,此问题可以通过改进光纤的掺杂和制作技术来克服。2)当以两种光纤为增益介质的放大器工作在相同增益水平下时,与普通掺铒光纤放大器相比,布拉格掺铒光纤放大器具有更大的输入信号动态范围。通过合理的设计,可以应用于放大器的增益控制领域。

参 考 文 献

- 1 Pochi Yeht, Amnon Yariv, Emanuel Marom. Theory of Bragg fiber[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1978, **68**(9): 1196~1201
- 2 Juan A. Monsoriu, Enrique Silvestre, Albert Ferrando *et al.*. High-index-core Bragg fibers: dispersion properties[J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(12): 1400~1405
- 3 Yi Ni, Shu Jia, Lei Zhang *et al.*. A novel design for all-solid silica Bragg fiber with zero-dispersion wavelength at 1550 nm [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(19): 4602~4607
- 4 Ren Guobin, Wang Zhi, Lou Shuqin *et al.*. Mode characteristics of high-index-core Bragg fibers [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2004, **15**(5): 565~568
任国斌,王智,娄淑琴等.高折射率芯Bragg光纤的模式特征[J].*光电子·激光*, 2004, **15**(5): 565~568
- 5 Ren Guobin, Wang Zhi, Lou Shuqin *et al.*. Dispersion properties of high-index-core Bragg fibers[J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(6): 1862~1867
任国斌,王智,娄淑琴等.高折射率芯Bragg光纤的色散特性研究[J].*物理学报*, 2004, **53**(6): 1862~1867
- 6 T. Katagiri, Y. Matsuura, M. Miyagi. All-solid single-mode Bragg fibers for compact fiber devices[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(11): 4314~4318
- 7 Caroline Lecaplain, Ammar Hideur, Sébastien Février *et al.*. Mode-locked Yb-doped Bragg fiber laser[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(18): 2879~2881
- 8 Wang Zhi, Jing Tao, Zhou Zhihua *et al.*. Band-rejection filter based on a Bragg fiber with a defect layer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(12): 1612~1616
王智,荆涛,周志华等.利用超格子模型对布拉格光纤的研究[J].*光学学报*, 2004, **24**(12): 1612~1616
- 9 Liu Xiaoyi, Zhang Fangdi, Zhang Min *et al.*. Polarization properties of high-index-elliptical-core Bragg fibers[J]. *Acta*

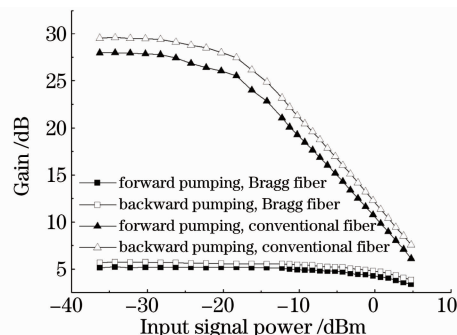


图7 两种掺铒光纤放大器的饱和增益特性

Fig. 7 Gain saturation characteristics of conventional and Bragg Er^{3+} -doped fiber amplifiers

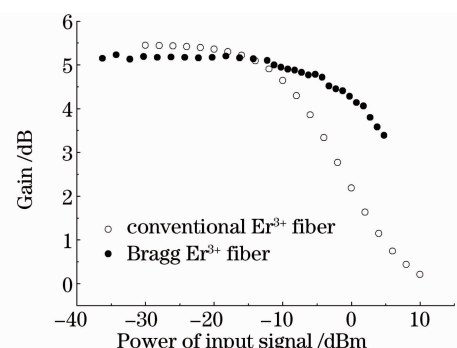


图8 增益水平较低时,两种掺铒光纤放大器的饱和增益特性

Fig. 8 Gain saturation characteristics of conventional and Bragg Er^{3+} -doped fiber amplifiers with low gain

Optica Sinica, 2006, **26**(9): 1319~1324

刘小毅, 张方迪, 张 民 等. 高折射率椭圆芯布拉格光纤的偏振特性[J]. *光学学报*, 2006, **26**(9): 1319~1324

10 Zhongjiao He. Band-rejection filter based on a Bragg fiber with a defect layer[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(3): 259~261

11 Wu Ben, Zhang Hui, Zhu Liangdong *et al.*. Magnetically tunable liquid crystal terahertz switch based on Bragg fiber[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(3): 1838~1843

吴 犇, 张 会, 朱良栋 等. 基于布拉格光纤的磁场调制液晶太赫兹开关[J]. *物理学报*, 2009, **58**(3): 1838~1843