

·激光技术·

三种C+L波段掺铒光纤 ASE 光源的实验对比研究

李 丽¹, 贾振安²

(1. 西藏民族大学 信息工程学院, 陕西 咸阳, 712082; 2. 西安石油大学 光电油气测井与检测教育部重点实验室, 西安 710065)

摘要:对常见的单级、双级以及三级结构的C+L波段掺铒光纤 ASE 光源进行实验研究,对比它们的性能并分析各自的优缺点。结果表明,单级和双级结构的C+L波段掺铒光纤 ASE 光源C波段和L波段光谱很难实现最佳匹配,导致平坦度不理想。虽然三级双泵浦结构光源结构较前两种较复杂,但通过优化光源参数可以使输出光谱具有更好的平坦度,从而更好地满足分布式光纤光栅传感系统、长距离光纤通信系统、光纤陀螺以及光谱测试等应用场合的要求。

关键词:超荧光光纤光源(SFS);掺铒光纤(EDF);C+L波段

中图分类号:TN253

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2015)-06-0018-04

Experiment Contrast Research on Three Kind of C+L Band Erbium-doped Fiber Amplified Spontaneous Emission Light Source

LI Li¹, JIA Zhen-an²

(1. School of Information Engineering, Xizang Minzu University, Xianyang 712082, China;

2. Ministry of Education Key Laboratory of Photoelectricity Gas-oil Logging and Detecting, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

Abstract: Based on experimental research on three kinds of C+L band Erbium-doped fiber amplified spontaneous emission (ASE) light source including signal-stage, two-stage and three-stage structure, the characteristics are compared and the advantages and disadvantages are analyzed. Results show that C band and L band spectrum of C+L band Erbium-doped fiber ASE light source with single-stage and two-stage structure is difficult to realize optimal matching and flatness is not ideal. Though the three-stage two-pumping structure light source is more complicated than that of the other two structures, the flatness of output spectrum is better through optimizing light source parameters. So the application requirements from distributed fiber Bragg grating (FBG) sensing system, long range fiber communication system, fiber gyroscope and spectrum testing are better satisfied.

Key words: super-fluorescent fiber source (SFS); Er-doped fiber (EDF); C+L band

C+L波段掺铒光纤超荧光宽带光源以其高稳定性、宽光谱、高功率输出等特点,在光纤传感、高精度光纤陀螺,特别是在现代波分复用系统(WDM)以及光通讯器件的测试中得到了广泛的应用^[1-3]。常见的C+L波段掺铒光纤超荧光宽带光源的结构有很多种,从光纤级数这个角度来划分,可以将其归

为单级结构^[4-5]、双级结构^[6-7]以及三级结构^[8-9]。在此基础上按照泵浦源接入的个数又可细分为单级单泵浦、单级双泵浦、双级双泵浦以及三级双泵浦等多种结构。单级单泵浦结构是基于光源四种基本结构中的单程后向结构实现的,此结构的最大特点是只用了一段光纤和一个泵浦源,所以不但结构紧

收稿日期:2015-10-26

基金项目:陕西省教育厅项目(11JS050);西藏民族大学校内项目(15MY12)

作者简介:李丽(1982-),女,讲师,现主要从事光电子学与光纤传感技术、电子信息技术的研究。

凑而且成本低,但是光源的平坦度较差,实用性不强,因此文中主要对常见的单级双泵浦、双级双泵浦以及三级双泵浦结构C+L波段掺铒光纤超荧光宽带光源进行实验研究,对比它们的性能,并分析各自的优缺点,以利于光纤光源的设计和选用。

1 C+L波段光源产生原理

图1为铒离子能级结构图。从图1所示的铒离子能级结构图中可以看出,掺铒光纤中C波段与L波段放大的自发辐射都是由能级 ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ 的跃迁产生。C波段放大自发辐射是由 ${}^4I_{13/2}$ 和 ${}^4I_{15/2}$ 主能级的斯塔克分裂能级的高能级之间跃迁产生,而L波段的放大自发辐射是主能级的斯塔克分裂能级的低能级之间的跃迁产生^[10]。铒离子吸收980 nm抽运光后在掺铒光纤的近端产生C波段放大的自发辐射光,其中部分C波段放大的自发辐射光又作为抽运源被铒光纤后端吸收,从而产生L波段放大自发辐射的光。因此,掺铒光纤光源实际上是一种三能级系统。由于斯塔克效应引起的能级裂变,铒离子的能级有一定的展宽,加之掺铒光纤光源结构采用非谐振腔形式,所以铒离子产生的并不是单一的1550 nm光,而是1500~1560 nm的超荧光。

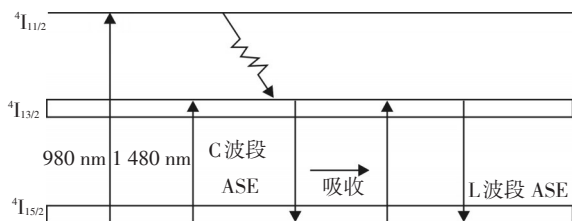


图1 铒离子能级结构

2 C+L波段光源实验对比研究

2.1 单级双泵浦结构

单级双泵浦结构使用两个泵浦源,并通过980 nm/1550 nm波分复用器WDM1和WDM2将其产生的抽运光注入到同一段掺铒光纤中,结构如图2所示。为了抽运出L波段的ASE荧光,掺铒光纤需要吸收更多的C波段ASE荧光,所以选用了在1530 nm处吸收峰比较高的掺铒光纤来提高转换效率。

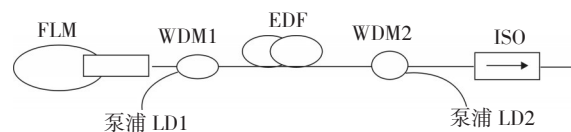


图2 单级双泵浦C+L波段ASE光源

此光源结构中使用的泵浦源为980 nm的激光二极管,采用的掺铒光纤的掺铒浓度大于1900 ppm,在1530 nm峰值吸收系数为9 dB,截止波长890 nm,数值孔径 >0.29 ,模场直径 $5.2 \mu\text{m}$ 。实验中通过不断优化掺铒光纤的长度和前向、后向抽运源的功率,最终确定掺铒光纤长度35 m,前向泵浦源功率为59 mW,后向泵浦源112 mW时,得到覆盖C+L波段的ASE光,如图3所示。

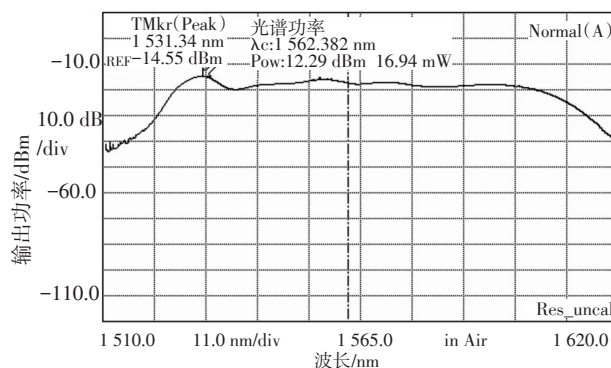


图3 单级单泵浦C+L波段光谱图

实验结果表明,光源输出功率为16.94 mW,平均波长为1562.382 nm,在1538~1598 nm波段范围内光谱的不平坦度 $<\pm 2.2 \text{ dB}$ 。单级结构光源虽然通过优化参数可以实现覆盖C+L波段的光源,但输出光谱的功率较低而且平坦度并不理想,除了1532 nm附近的本征峰以外,其余波段仍有不平坦的突起。

单级双泵浦结构用两级泵浦抽运一段光纤得到了C+L波段ASE光。首先,掺铒光纤近端的 Er^{3+} 吸收第一级980 nm泵浦光产生C波段ASE,由于掺铒光纤的长度较长,这部分光将作为种子光进入掺铒光纤后部分再被吸收,产生L波段ASE光。同时第二级泵浦光进入光纤后段被 Er^{3+} 吸收产生C波段ASE光,其中前向C波段光会进入光纤前部分,而后向C波段ASE光将与L波段ASE光输出产生C+L波段ASE光。通过实验可知,当光纤长度达到了一定长度时,继续增加,C波段在1530 nm处的发射峰开始

逐渐抬升,这是因为随着光纤加长,两端泵浦产生的C段ASE积累的速度开始超过了其作为二次泵浦所消耗的速度。当光纤减短时,输出C波段光功率有所下降,主要偏向于更短的波长方向,1 550~1 575 nm波段范围内的光谱几乎不变,L波段的谱型也少有下降,这使得输出光谱更加不平坦,平均波长向短波方向漂移。因此,通过优化光纤长度和调节泵浦源功率很难实现高平坦度的C+L波段ASE光谱。

2.2 双级双泵浦结构

双级双泵浦结构是目前比较流行的一种C+L波段掺铒光纤超荧光光源结构。它是在单级双泵浦结构的基础上优化得到,此光源结构采用两个泵浦源抽运两段光纤的方式,结构较单级结构复杂,但由于采用两个泵浦分别抽运两级光纤的结构形式,所以输出光谱的参数较单结构更理想。

图4是典型的双级双泵浦光源结构图。其中第一级采用双程前向,第二级采用后向作为最终的输出。此光源结构中的两个泵浦光源仍为980 nm激光二极管。EDF1的掺铒浓度为700 ppm,截止波长为853.5 nm,在1 200 nm处的本底损耗 ≤ 50 dB/km,在980 nm处的峰值吸收系数为4.5 dB/m,数值孔径 ≥ 0.2 ,模场直径为6.68 μm ;图中EDF2的掺铒浓度大于1 900 ppm,光纤数值孔径为0.20,模场直径为6.8 μm ,截止波长为960 nm,980 nm峰值吸收为8.6 dB/m,1 530 nm附近峰值吸收为14.2 dB/m。

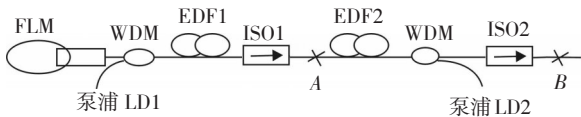


图4 双级双泵浦C+L波段ASE光源

通过实验不断优化两级光纤的长度,最终选定第一级掺铒光纤EDF1长度为7.5 m,二级铒纤EDF2长度为31.2 m;调节两级泵浦光功率,当一级泵浦源功率为65.1 mW,二级泵浦源功率为86.6 mW时,其输出光谱见图5所示。

实验结果表明,输出光功率为18.04 mW,平均波长为1 555.199 nm,在1 537~1 597 nm波段范围内光谱的不平坦度 $\leq \pm 1.9$ dB。双级双泵浦结构较单级双泵浦结构输出光谱的平坦度和功率均有所改善,但C波段和L波段光谱很难实现最佳匹配,输出

的C+L波段光谱在1 570 nm附近容易产生突起。

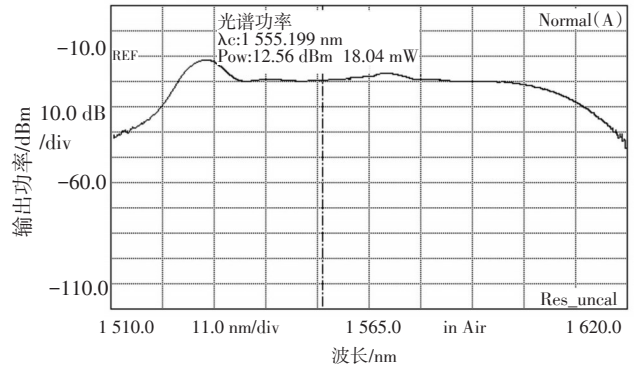


图5 双级双泵浦C+L波段光谱图

双级双泵浦结构利用两级后削弱了C波段的输出功率,增强了L波段输出功率。泵浦光源通过第一级掺铒光纤被铒离子吸收前向输出C波段光,C波段光作为种籽光进入第二级光纤后部分被吸收产生了L波段光。最后L波段光与未被吸收的C波段光和第二级产生的后向C波段光形成C+L波段ASE光。通过实验发现,当第一级泵浦功率增加时,总的输出功率有减小的趋势,但平均波长向长波方向偏移,光源输出平坦度得到了改善。当第一级泵浦功率保持不变,第二级泵浦功率减小时,由于第一级中的ASE光及光纤环形镜的均衡作用,故在一定范围内输出光的变化比较小,稳定性比较好,当第二级变化明显,同时第一级泵浦功率增加时,总的输出减小,平坦度明显改善。但无论怎么调节两级泵浦源功率,输出C+L波段光谱在1 570 nm附近容易产生突起,C波段和L波段光谱很难实现最佳匹配。

2.3 三级双泵浦结构

图6为三级双泵浦C+L波段光源结构图。

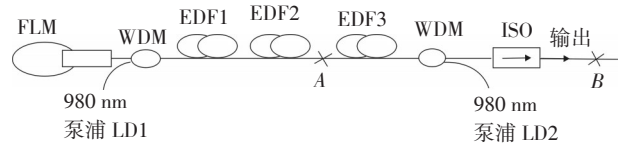


图6 三级双泵浦C+L波段ASE光源

由图6可以看出,在双级结构的一级和二级中间增加一段光纤。此结构中使用两个980 nm激光二极管作为泵浦源,第一个采用前向泵浦方式,第二个采用后向泵浦方式。EDF1和EDF3为同一型号光纤,在1 530 nm峰值吸收系数为9 dB,截止波

长 890 nm, 数值孔径 >0.29, 模场直径 5.2 μm 。EDF2 在 1 530 nm 峰值吸收系数为 6.5 dB, 截止波长 860 nm, 数值孔径 >0.27, 模场直径 4.8 μm 。

通过实验不断优化三级光纤的长度, 最终选定 EDF1、EDF2 和 EDF3 的长度分别为 11.5 m、53 m 和 6.5 m。调节两级泵浦光功率, 当一级泵浦功率为 65 mW, 二级泵浦功率为 115 mW 时, 输出功率为 18.04 mW, 平均波长为 1 564.56 nm, 输出光谱如图 7 所示。

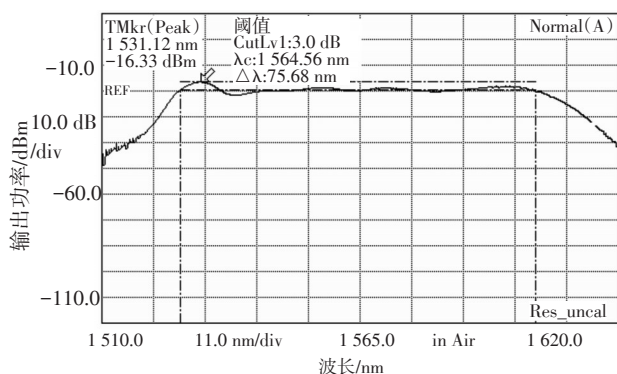


图 7 三级双泵浦 C+L 波段光谱图

实验结果表明, 加入光纤环形镜的三级双泵浦结构宽带光源 C+L 波段输出光谱的 3 dB 带宽可达到 75.68 nm (1 526.72~1 602.4 nm), 在 1 543~1 603 nm 波段范围内光谱的不平坦度 $<\pm 1.3$ dB。

三级双泵浦光源第一级光纤中铒离子吸收大功率 980 nm 抽运光后产生前向 C 波段 ASE 光; C 波段 ASE 光进入第二级长度较长、铒离子掺杂浓度较低的光纤中, 几乎被完全吸收产生平坦度很高的 L 波段 ASE 光; 第三级光纤中铒离子吸收二级泵浦 980 nm 抽运光后产生功率较高的后向 C 波段 ASE 光。C 波段与 L 波段 ASE 光组合后从 B 点输出 C+L 波段 ASE 光。在一定范围内调节 LD1 或 LD2 的功率, 输出的 C+L 波段 ASE 光谱中 L 波段或 C 波段光谱可以相对独立的改变, 相互间影响较小, 所以在三级掺铒光纤型号选择合适的情况下, 通过调节两级泵浦功率, 在一定的光纤长度范围内都可以实现 C 波段和 L 波段 ASE 较好的匹配, 消除了 1 570 nm 附近的突起, 输出高平坦度的 C+L 波段 ASE 光。

3 结 论

实验研究结果表明, 单级结构 C+L 波段掺铒

光纤 ASE 光源结构简单紧凑, 但是光源不够平坦是它最大的缺点。双级双泵浦结构 C+L 波段掺铒光纤 ASE 光源利用了一些基本结构的优点, 可以较好地实现 C+L 波段宽带 ASE 光输出, 但 C 波段和 L 波段光谱很难实现最佳匹配, 输出的 C+L 波段光谱在 1 570 nm 附近容易产生突起。三级双泵浦结构虽然光源结构较前两种较复杂, 但通过优化参数三级结构光源可以消除 1 570 nm 附近的突起, 使输出光谱具有更好的平坦度, 在 1 543~1 603 nm 波段范围内光谱的不平坦度 $\leq \pm 1.3$ dB, 因此可以更好地满足分布式光纤光栅传感系统、长距离光纤通信系统、光纤陀螺以及光谱测试等应用场合的要求。

参 考 文 献

- [1] LIU Y G, JIA ZH A, QIAO X G, et al. Superfluorescent fiber source achieving multisignal power equalization in distributed fiber Bragg grating sensing [J]. *Optical Engineering*, 2011, 50(12): 125004.
- [2] 李颖娟, 刘延虎, 黄皓, 等. 光纤陀螺用掺铒超荧光光纤光源输出特性研究[J]. *应用光学*, 2008, 29(6): 984-989.
- [3] 罗志会, 陈池. 大量程分布式光纤传感器的研究与应用[J]. *光电子·激光*, 2010, 21(6): 851-856.
- [4] 乔学光, 习聪玲, 贾振安, 等. 一种简单而性能优良的 C+L 波段掺铒宽带光源[J]. *半导体光电*, 2007, 28(1): 23-26.
- [5] 王秀琳, 明海, 王安廷, 等. 单级结构 C+L 波段掺铒光纤宽带光源[J]. *中国激光*, 2006, 33(2): 166-170.
- [6] 高伟清, 蒙红云, 刘艳格, 等. 一种新颖的反射结构高功率超宽带光纤光源[J]. *中国激光*, 2004, 31(5): 591-594.
- [7] 刘颖刚, 乔学光, 贾振安, 等. 一种高性能光纤 ASE 光源的优化与研究[J]. *光电子·激光*, 2011, 22(10): 1475-1478.
- [8] 刘颖刚, 贾振安, 乔学光, 等. 三级双泵浦结构光纤 ASE 光源输出光谱平坦度的改善[J]. *光电子·激光*, 2012, 23(11): 2061-2065.
- [9] 贾振安, 李丽, 乔学光, 等. 三级双泵浦结构高平坦度 C+L 波段超荧光光源[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(3): 559-562.
- [10] PAUL F W, Dignonnet M J F, Kim B Y, et al. Characteristics of erbium-doped superfluorescent fiber sources for interferometric sensor applications [J]. *Lightwave Technol*, 1994, 12(3): 550-567.