

掺铒光纤自发辐射宽带光源的带宽优化研究

郝蕴琦, 贾若一, 丁贝贝, 钟梦阳, 杨坤

Bandwidth optimization research of wide-band optical source with the Er³⁺-doped fiber amplified spontaneous emission

引用本文:

郝蕴琦, 贾若一, 丁贝贝, 钟梦阳, 杨坤. 掺铒光纤自发辐射宽带光源的带宽优化研究[J]. *激光技术*, 2023, 47(4): 500–505.

HAO Yunqi, JIA Ruoyi, DING Beibei, ZHONG Mengyang, YANG Kun. Bandwidth optimization research of wide-band optical source with the Er³⁺-doped fiber amplified spontaneous emission[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2023, 47(4): 500–505.

您可能感兴趣的其他文章

1. 四波混频对掺铒光纤激光光谱展宽特性的影响

引用本文: 王丹凤, 张恩涛, 姜明瑞, 等. 四波混频对掺铒光纤激光光谱展宽特性的影响[J]. *激光技术*, 2023, 47(3): 372–379.

2. 掺铋光纤铋活性中心发光机理的研究进展

引用本文: 贾宝楠, 王付刚, 孙仕豪, 等. 掺铋光纤铋活性中心发光机理的研究进展[J]. *激光技术*, 2020, 44(6): 657–663.

3. 基于FPGA的光纤光栅温度传感器高速解调系统

引用本文: 王伟, 张天阳, 陈海滨, 等. 基于FPGA的光纤光栅温度传感器高速解调系统[J]. *激光技术*, 2018, 42(6): 849–853.

4. 基于MOPA结构的1064nm单频光纤激光器

引用本文: 朱志坚, 薛峻文, 王玉珂, 等. 基于MOPA结构的1064nm单频光纤激光器[J]. *激光技术*, 2019, 43(6): 800–803.

5. 基于粒子群优化算法的级联喇曼光纤放大器

引用本文: 巩稼民, 徐雨田, 何佳蔓, 等. 基于粒子群优化算法的级联喇曼光纤放大器[J]. *激光技术*, 2020, 44(6): 749–753.

文章编号: 1001-3806(2023)04-0500-06

掺铒光纤自发辐射宽带光源的带宽优化研究

郝蕴琦^{1,2,3}, 贾若一^{1,2,3}, 丁贝贝^{1,2,3}, 钟梦阳^{1,2,3}, 杨坤^{1,2,3*}

(1. 郑州轻工业大学 物理与工程学院, 郑州 450001; 2. 郑州轻工业大学 河南省电磁信息功能材料重点实验室, 郑州 450001; 3. 郑州轻工业大学 郑州市信息光学与光电技术重点实验室, 郑州 450001)

摘要: 为了解决掺铒光纤放大自发辐射宽带光源的自然输出光谱中单峰造成的窄带宽问题, 采用双程、后向光源结构消除抽运光输出, 同时外接未抽运掺铒光纤以展宽可用带宽, 进行了理论分析和实验验证; 研究了掺铒光纤长度和光纤反射镜反射系数对光源输出光谱的影响, 分析了外接未抽运掺铒光纤的长度对光源带宽的优化效果。结果表明, 随着掺铒光纤长度的增加, 放大自发辐射光谱 C 波段逐渐降低, L 波段逐渐抬升; 随着反射镜反射系数的增加, 放大自发辐射光谱带宽提高; 此外, 当抽运掺铒光纤和外接未抽运掺铒光纤的长度分别为 6 m 和 2 m 时, 放大自发辐射宽带光源输出带宽为 50.31 nm, 和未采用外接掺铒光纤时相比, 带宽增加 44 nm。上述研究结果可为宽带光源的性能优化提供参考。

关键词: 光纤光学; 光谱带宽优化; 双程后向外接未抽运掺铒光纤; 掺铒光纤; 宽带光源

中图分类号: TN253

文献标志码: A

doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2023.04.009

Bandwidth optimization research of wide-band optical source with the Er³⁺-doped fiber amplified spontaneous emission

HAO Yunqi^{1,2,3}, JIA Ruoyi^{1,2,3}, DING Beibei^{1,2,3}, ZHONG Mengyang^{1,2,3}, YANG Kun^{1,2,3}

(1. College of Physics and Electric Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China; 2. Henan Key Laboratory of Magnetolectric Information Functional Materials, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China; 3. Zhengzhou Key Laboratory of Information Optics and Photoelectric Technology, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In order to solve the natural narrow bandwidth of wide-bandwidth optical source with Er³⁺-doped fiber amplified spontaneous emission, the configuration of double-pass, backward pumped, and connected unpumped-fiber was proposed to eliminate the influence of pump source and broaden its bandwidth. The numerical simulation and experiment were carried out. The influence of Er³⁺-doped fiber length and reflection coefficient of fiber reflect mirror on the optical spectrum was analyzed in detail. The optimization effect of unpumped Er³⁺-doped fiber on the amplified spontaneous emission output spectrum was studied. The results show that, with increasing the length of pumped fiber, the C-band of the amplified spontaneous emission spectrum decreases slowly, and L-band raises. When the reflect coefficient of mirror increases, the bandwidth of amplified spontaneous emission was broadened correspondingly. The bandwidth of amplified spontaneous emission is 50.31 nm when the pumped and unpumped fiber is 6 m and 2 m respectively, which is improved 44 nm. All the results obtained could provide support for the design of wide-band optical source.

Key words: fiber optics; optical spectrum bandwidth optimization; double-pass, backward pumped, and connected unpumped-fiber; Er³⁺-doped fiber; wide-band optical source

引言

宽带光源作为光学系统的最前端光源, 在光纤传感系统、光谱分析系统等技术领域均具有广泛的应用^[1-3]。目前, 宽带光源一般利用超辐射发光二极管 (super luminescent diode, SLD)^[4-6] 或有源光纤的放大自发辐射^[7-9] 来实现。随着各种有源光纤及其应用技术的发展, 基于掺铒光纤放大自发辐射 (amplified

基金项目: 河南省科技攻关计划资助项目(212102210031); 河南省高等学校青年骨干教师培养计划资助项目(2021GGJS092)

作者简介: 郝蕴琦(1985-), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为光纤传感技术。

* 通讯联系人。E-mail: yangkun@zzuli.edu.cn

收稿日期: 2022-05-16; 收到修改稿日期: 2022-06-13

spontaneous emission, ASE) 的宽带光源获得了研究者的重点关注^[10-12]。转换效率、可用光谱宽度和平坦度是人们关注的宽带光源性能的核心参数^[13]。掺铒光纤宽带 ASE 光源在 C 波段或 C+L 波段的输出光谱,整体上在 1530 nm 附近光强较高,而在 1560 nm 附近强度大约降低 3~4 倍,光谱呈现单峰结构,严重降低了光源的带宽和平坦度,不利于实际应用^[14-16]。

中国科技大学 QIAN 教授团队针对 ASE 光谱单峰结构所造成的频谱过窄现象,提出了单程/后向抽运结构,利用输出端所加 0.8 m 未抽运的掺铒光纤吸收 1530 nm 附近的荧光,尖峰被抑制,带宽获得了展宽^[17]。基于此思想,各种结构相继被提出^[10,18-19]。WANG 提出双程结构,采用两级掺铒光纤,其中第 1 级掺铒光纤被前向抽运、第 2 级掺铒光纤未被抽运^[18]。HE 等人抽运两级掺铒光纤,10% 抽运光用来后向调控 C 波段,90% 抽运光用来前向调控 L 波段,光谱综合后获得平坦度的提高^[19]。燕山大学 CHEN 等人采用前向抽运,调节单级掺铒光纤的长度使之略长于饱和长度,获得了平坦度优化的 ASE 光谱^[10]。但是,在上述几种前向结构中,ASE 宽带光和多余的 980 nm 抽运光混合输出。

在掺铒光纤的前、后两个方向上,ASE 均有宽带光输出。单程结构只利用了掺铒光纤中单个方向上的自发辐射,本文作者利用光纤型反射镜构建双程结构,以降低抽运功率和提高光源转换效率;同时,采用后向抽运结构,消除 ASE 光源输出中的 980 nm 抽运光;此外,在输出端外接一段未抽运的掺铒光纤,用以吸收 C 波段的峰和抬高 L 波段的功率,最终获得同时提高抽运效率和增加可用带宽的 ASE 宽带光源。数值仿真了不同掺铒光纤长度和光纤反射镜不同反射系数时 ASE 光源的输出光谱;在此基础上,数值分析和实验研究了外接的未抽运光纤长度对输出光谱带宽的优化效果。本文中的研究结果可为提高基于掺铒光纤的 ASE 宽带光源的性能提供参考。

1 基本原理

抽运掺杂有金属铒离子 Er^{3+} 的有源光纤,其放大自发辐射^[20]光的谱宽较宽,可作为宽带光源使用。根据金属铒离子 Er^{3+} 的能级分布^[20],如图 1 所示,主要有 3 个能级。其中,能级最低的 $^4\text{I}_{15/2}$ 为基态; $^4\text{I}_{13/2}$ 为第一激发态,处于亚稳态;能级最高的 $^4\text{I}_{11/2}$ 为第 2 激发态,处于激发态,寿命很短仅几个微秒。 $^4\text{I}_{15/2}$ 、 $^4\text{I}_{13/2}$ 和 $^4\text{I}_{11/2}$ 三者形成了经典的三能级结构。在 980 nm 抽

运光的激发下,位于基态的铒离子吸收能量,从 $^4\text{I}_{15/2}$ 基态被抽运到 $^4\text{I}_{11/2}$ 激发态上;之后,激发态上的铒离子又迅速通过无辐射过程到达了亚稳态 $^4\text{I}_{13/2}$ 。亚稳态上铒离子的能级寿命长,易和基态上铒离子数量形成粒子数反转。当 Er^{3+} 的 3 个能级发生 Stark 裂变时, $^4\text{I}_{15/2}$ 、 $^4\text{I}_{13/2}$ 和 $^4\text{I}_{11/2}$ 分别变成为 8 个、7 个和 6 个子能级。在 $^4\text{I}_{13/2}$ 和 $^4\text{I}_{15/2}$ 所有子能级中的相对高能级之间,粒子跃迁生成 C 波段 ASE;同时,子能级中的相对低能级之间,粒子跃迁生成 L 波段 ASE。总之, $^4\text{I}_{15/2}$ 到 $^4\text{I}_{13/2}$ 能级之间粒子跃迁所对应的增益谱,其带宽较宽,因此能够辐射输出宽带光。

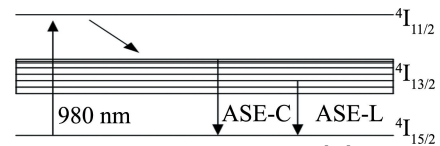


图 1 铒离子能级示意图^[20]

Fig. 1 Energy levels of Er^{3+} ^[20]

掺铒光纤中位于基态的铒离子被 980 nm 激光抽运后,产生了宽带的放大自发辐射。掺铒光纤长度较长时,对于 980 nm 抽运源而言,足够多的铒离子可以被抽运至高能级。在掺铒光纤的近端,C 波段 ASE 光强较大,L 波段 ASE 光强较小。随着近端铒纤的 ASE 在掺铒光纤中的传输,远端掺铒光纤中的铒离子持续被近端的 ASE 抽运,产生了 L 波段的光功率持续增加和抬升的效果。综合 980 nm 激光和掺铒光纤前端 ASE 的共同抽运作用, C 波段和 L 波段之间的增益落差降低,达到提高 ASE 光谱的平坦度和拓展可用带宽的目的。此时,如果增加抽运光功率,更多的铒离子将被抽运至高能级,掺铒光纤中的二次吸收过程被削弱,呈现出 C 波段光强逐渐增强的现象,随之光谱平坦度降低、可用带宽减小。为了拓宽掺铒光纤 ASE 光源的带宽,需要对光源的结构进行分析和优化设计。

2 光谱输出特性分析

后向抽运、双程的掺铒光纤 ASE 宽带光源结构如图 2 所示,包括光纤环反射镜(fiber loop mirror, FLM)、掺铒光纤 Er^{3+} -doped fiber、波分复用器(wavelength division multiplex, WDM)、980 nm 抽运激光器和光隔离

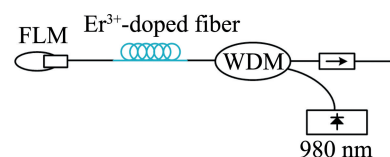


图 2 ASE 宽带光源结构示意图

Fig. 2 Structure of ASE wide-bandwidth optical source

器。掺铒光纤相关参数如下:截止波长 941 nm、模场直径 5.8 μm 、1530 nm 处波长吸收系数 7.11 dB/km、1200 nm 波长吸收系数 11.2 dB/km。980 nm 激光抽运掺铒光纤时,同时产生前向和后向的自发辐射光。光纤环反射镜将前向 ASE 反射回到掺铒光纤中,在掺铒光纤中再次用来抽运,提高了 ASE 光谱在 L 波段上的功率,从而改善 ASE 光谱的平坦度和可用带宽。光隔离器消除端面反射的影响,提高光源的输出稳定性。

2.1 掺铒光纤长度对光谱的影响

作为核心元件,掺铒光纤的长度影响 ASE 宽带光

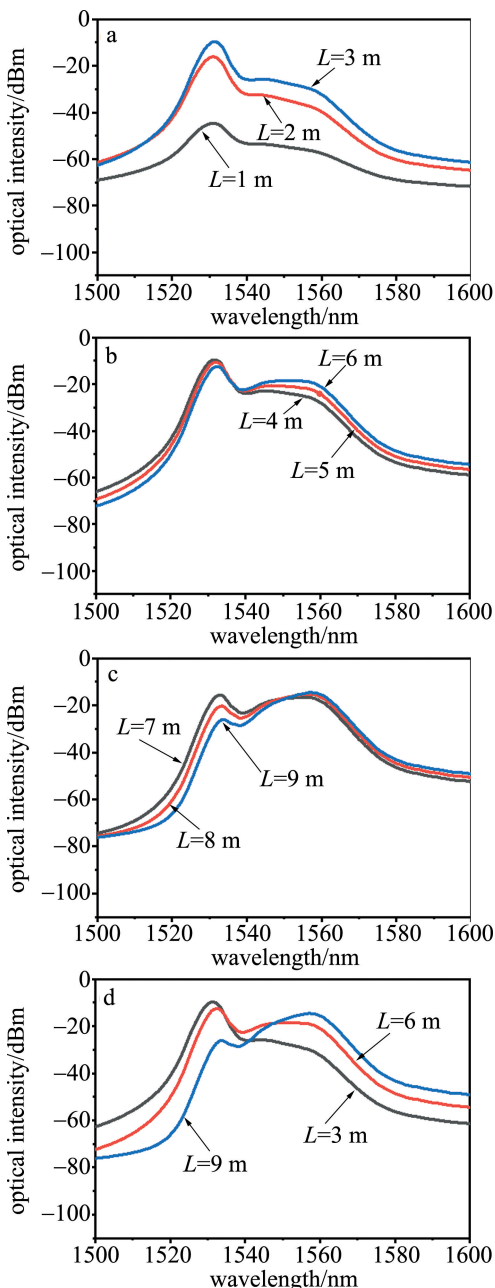


图3 掺铒光纤不同长度时的 ASE 光谱

Fig. 3 ASE output spectrum with different Er^{3+} -doped fiber length

源的输出谱。对比研究掺铒光纤的长度从 1 m~9 m 时输出光谱的变化,如图 3a~图 3c 所示。

对比发现,当掺铒光纤长度 $L=1$ m 较短时,光纤中的铒离子总数较少,输出光功率较低,C 波段和 L 波段之间光功率落差大。随着光纤长度的增加(L 为 3 m~5 m),光谱在 1530 nm 附近增益增加,在 1530 nm 附近出现尖峰。这是因为掺铒光纤吸收 980 nm 抽运光后,首先在掺铒光纤的近端产生 C 波段的 ASE;由于光谱在 1530 nm 处的增益大,ASE 光谱在前半部分功率上升快,结果造成整个光谱的平坦性降低。

在掺铒光纤长度由 5 m 增加到 9 m 的过程中,C 波段 ASE 作为二次抽运源,抬升了 L 波段的光强。同时,掺铒光纤中的铒粒子总数大于饱和数,这些多余的铒纤吸收 C 波段光,位于 1530 nm 附近的波峰逐渐衰弱,光谱整体趋于平坦。随着铒纤继续加长,1530 nm 处的尖峰继续被削低,而 1560 nm 附近持续被抬高,光谱呈现前低后高的形状。光谱对比如图 3d 所示,变化过程为前高后低、平坦、前低后高。

2.2 光纤反射镜对光谱的影响

根据图 2,光纤反射镜将掺铒光纤中 C 波段 ASE 反射回到掺铒光纤中,进行二次吸收放大,抬升光谱的 L 波段部分,有效改善光谱的带宽。为了深入研究反射镜系数对于 ASE 光谱的影响,本文中以 6 m 掺铒光纤为对象,光纤反射镜的反射系数分别为 1%、33%、66%以及 99%,对应的宽带光源 ASE 输出谱如图 4 所示。

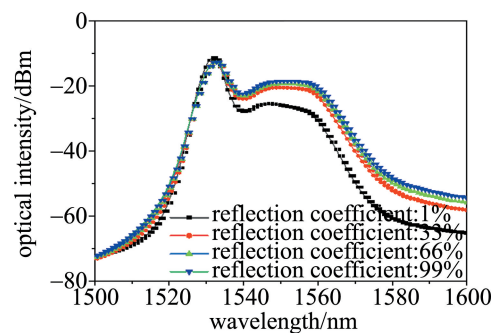


图4 反射镜不同反射系数时的 ASE 光谱

Fig. 4 ASE output spectrum with different reflect coefficients of the reflect mirror

从图 4 中可以看出,当反射镜系数为 1%时,光谱呈现出掺铒光纤 ASE 的经典谱形,光谱的带宽较低。随着反射系数的增加,较多的前向 ASE 光再次返回掺铒光纤,L 波段的光功率逐渐上升。整体上,ASE 光谱的 C 波段部分几乎没有变化,但后部 L 波段部分持续升高,即增加反射镜的反射系数,可以提高 ASE 宽带

光源的光谱平坦度和增加可用带宽。此外,对着反射系数的提高,宽带光源的输出光强也在增加,对应提高了宽带光源的转换效率。

3 利用未抽运掺铒光纤的带宽优化

3.1 仿真研究

根据第 2 节中双程、后向抽运的掺铒光纤 ASE 宽带光源仿真结果,为了进一步优化 ASE 光源的光谱带宽,利用掺铒光纤的吸收和发射特性,在光源的输出端接上一段未抽运的掺铒光纤,利用该掺铒光纤的不同长度来调控宽带光源的输出光谱,该装置如图 5 所示。

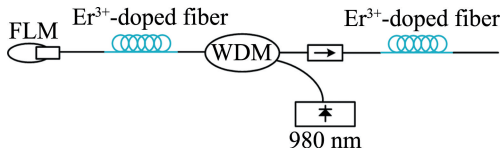


图 5 优化结构实验原理图
Fig. 5 Optimized ASE structure

实验中以 6 m 长掺铒光纤为研究对象,其抽运功率设置为 1 W,光纤反射镜系数设置为 99%。在光隔离器输出端口,加入不同长度的未抽运掺铒光纤,探究其长度对宽带光源的影响。当未抽运铒纤的长度从 1 m 逐步增加至 6 m 时,对应得到的 ASE 光源光谱图如图 6a 所示,对应的带宽变化如图 6b 所示。

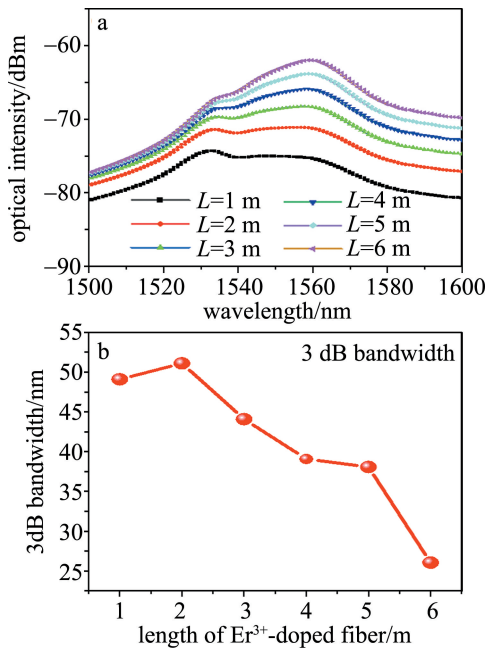


图 6 a—优化装置的 ASE 光谱 b—优化后的带宽

Fig. 6 a—ASE spectrum of optimized structure b—the improved bandwidth

从图 6 中可以看出,随着外接未抽运掺铒光纤长度的增加,输出光强逐渐增加,但 1560 nm 附近的光强

比 1530 nm 附近的光强增加得快,因此呈现出前高后低、平坦、前低后高的变化过程。当未抽运掺铒光纤长度从 1 m 逐步增加至 6 m 时,其 3 dB 带宽依次为 49.09 nm、51.10 nm、44.08 nm、39.07 nm、38.07 nm 和 26.05 nm,如表 1 所示。可以看出,未抽运掺铒光纤长度为 2 m 时,光谱平坦度最好,带宽为 51.10 nm。

表 1 不同长度的未抽运掺铒光纤优化后的 3 dB 带宽

Table 1 Optimized 3 dB bandwidth of ASE spectra with different unpumped Er³⁺-doped fiber length

length of unpumped fiber/m	3 dB linewidth/nm
1	49.09
2	51.10
3	44.08
4	39.07
5	38.07
6	26.05

3.2 实验研究

为了验证该装置的优化效果,搭建如图 5 所示的 ASE 光源系统。掺铒光纤和未抽运掺铒光纤的长度分别为 6 m 和 2 m (Nufern, EDFC-980-HA), FLM (上海瀚宇光纤通信有限公司) 提供前向 ASE 的光反馈,光隔离器 (上海瀚宇光纤通信有限公司) 保证输出光的单向传输,在光源输出端利用光谱仪 (Yokoga-wa 公司, AQ6370C, 分辨率 0.02 nm) 测量光谱。有、无外接 2 m 未抽运光纤的光谱实验结果对比如图 7a 和图 7b 所

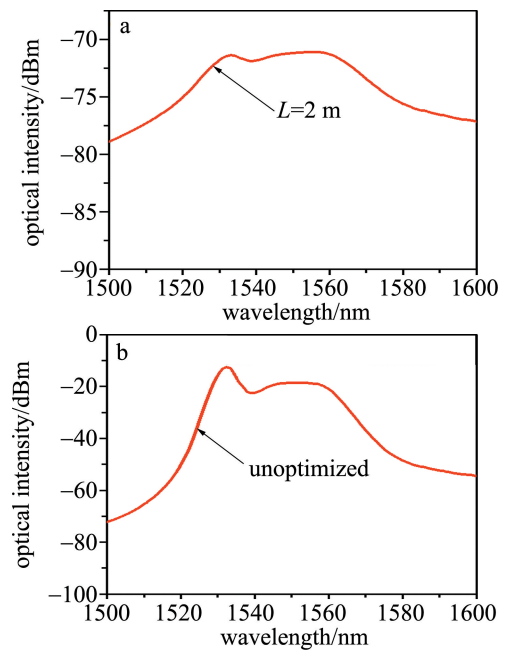


图 7 a—优化后 ASE 宽带光源光谱 b—优化前 ASE 宽带光源光谱
Fig. 7 a—the optimized spectrum of ASE source b—the unoptimized spectrum of ASE source

示。此时,位于 1530 nm 附近的峰被明显削弱,这是由于外接掺铒光纤的吸收特性,有效吸收位于 1530 nm 处的高峰,从而增加了光谱整体 3 dB 带宽。未优化前宽带光源线宽为 5.96 nm,优化后该光源的 3 dB 线宽为 50.31 nm,增加了 44 nm。

需要说明的是,本文中双程后向抽运方案虽然提高了 ASE 光源的带宽,未抽运 2 m 长掺铒光纤抑制了 1530 nm 附近尖峰抬升了 L 波段,但是,有源光纤和无源光纤的接头损耗、以及掺铒光纤宽带输出进入未抽运掺铒光纤时发射谱与吸收谱之间的关系^[19],最终造成了 1520 nm~1560 nm 范围内 ASE 宽带光源输出功率整体下降,这和参考文献[17]中报道的结果一致。30 mW 的 980 nm 光源抽运时,ASE 宽带光源输出功率为 4.13 mW,转换效率为 14%。实现高平坦度、宽带宽大功率 ASE 宽带光源输出,需要额外增加一个 980 nm 光源前向抽运掺铒光纤,并结合抽运光纤和未抽运光纤之间的长度关系,优化调整两个抽运光源的功率比例,获得 C 波段和 L 波段的功率匹配,同时获得较高的光源输出功率。

4 结论

以双程、后向抽运结构的掺铒光纤 ASE 宽带光源装置为研究对象,研究了核心掺铒光纤长度和反射镜反射系数对 ASE 光源的影响,在此基础上进一步分析外接未抽运掺铒光纤长度对 ASE 宽带光源输出的优化效果。当抽运功率一定且充足的时候,随着光纤长度的增加,光能量逐渐从 C 波段过渡到 L 波段,光谱在 6 m 时平坦性最优;较大反射系数的光纤反射镜能够有效地提升光谱平坦度。在光源的输出端外接一段未抽运掺铒光纤进一步优化 ASE 输出光谱,当该光纤长度为 2 m 时,3 dB 带宽最大 50.31 nm,对比未优化时带宽增加 44 nm。上述研究结果表明,采用外接 2 m 未抽运光纤优化后的 ASE 宽带光源能够满足光纤传感等系统的宽带宽需求。

参考文献

- [1] GU H C, YAO G F, HUANG J B, *et al.* Fabrication of weak fiber Bragg grating with conventional fiber based on phase mask [J]. *Laser Technology*, 2022, 46(2): 149-154 (in Chinese).
顾宏灿,姚高飞,黄俊斌,等.基于相位掩模板的常规光纤制备弱反射光栅[J].*激光技术*, 2022, 46(2): 149-154.
- [2] LI H, GUO Z L, YANG W T, *et al.* Research of the liquid level sensing technology based on a hollow fiber multimode interference optical fiber [J]. *Laser Technology*, 2022, 46(1): 120-124 (in Chinese).
李虎,郭子龙,杨文婷,等.空芯光纤多模干涉型光纤液位传感技术研究[J].*激光技术*, 2022, 46(1): 120-124.
- [3] LIU Q, BI W H, FU X H, *et al.* Refractive index sensing characteristic of superimposed long period grating on few mode fiber [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(1): 0106001 (in Chinese).
刘强,毕卫红,付兴虎,等.基于少模光纤长周期光栅叠栅的折射率传感特性[J].*光子学报*, 2018, 47(1): 0106001.
- [4] ZI H, XUE Zh Q, WANG L H, *et al.* Study of wide spectrum superluminescent diode at 1550 nm [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(4): 0420001 (in Chinese).
瞿慧,薛正群,王凌华,等.1550 nm 宽光谱超辐射发光二极管的研制[J].*红外与激光工程*, 2018, 47(4): 0420001.
- [5] LI W H, WANG D L, LI Zh K, *et al.* Study of high power low polarization superluminescent diodes [J]. *Laser & Infrared*, 2022, 52(2): 217-222 (in Chinese).
李吴皓,王定理,李中坤,等.大功率低偏振度超辐射发光二极管的研制[J].*激光与红外*, 2022, 52(2): 217-222.
- [6] ZHOU Sh, XU J, TIAN K, *et al.* 1310 nm quantum-well superluminescent diode with high power and high degree of polarization [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2021, 42(4): 483-487 (in Chinese).
周帅,许璠,田坤,等.1310 nm 大功率高偏振度量子阱超辐射发光二极管[J].*半导体光电*, 2021, 42(4): 483-487.
- [7] XI C L. Study on S+C+L ultra broadband light source [J]. *Laser Technology*, 2012, 36(6): 822-824 (in Chinese).
习聪玲.S+C+L 超宽带光源的研究[J].*激光技术*, 2012, 36(6): 822-824.
- [8] WANG X L, HUANG W C. Band selective C- or L-band ASE source using unpumped erbium-doped fiber with an optical switch [J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 48: 263-266.
- [9] CHENG X S, AHMAD H, HARUN S W. Broadband ASE source using bismuth-based erbium-doped fibers in double-pass setup [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2010, 52(7): 1636-1638.
- [10] CHEN Y E, ZHOU Y K, YANG D W, *et al.* A temperature-insensitive amplified spontaneous emission broadband source based on er-doped fiber [J]. *Chinese Physics Letters*, 2018, 35(4): 53-55.
- [11] PETROV A B, GUMENYUK R, ALIMBEKOV M S, *et al.* Broadband superluminescent erbium source with multiwave pumping [J]. *Optics Communications*, 2018, 413: 304-309.
- [12] WU X, RUAN Sh Ch, LIU Ch X. High-stable and broadband erbium-doped superfluorescent photonic crystal fiber source [J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(9): 095005.
- [13] GUO X D, QIAO X G, JIA Zh A, *et al.* High-power broadband light source for fiber Bragg grating sensors [J]. *Journal of Transducer Technology*, 2005, 24(1): 75-77 (in Chinese).
郭小冬,乔学光,贾振安,等.光纤光栅传感器用的高功率宽带光源[J].*传感器技术*, 2005, 24(1): 75-77.
- [14] CAO F, SHOU G Ch, HU Y H, *et al.* Experimental research on crosstalk in a spectrum-spliced DWDM passive optical network [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2009, 20(8): 1033-1036 (in Chinese).
曹帆,寿国础,胡怡红,等.频谱分割 DWDM 无源光网络系统串扰实验研究[J].*光电子·激光*, 2009, 20(8): 1033-1036.
- [15] LI Ch Sh, YAN B B, WANG D P, *et al.* Fiber Bragg grating sensing by ultra-broadband light source based on bismuth-erbium co-doped fiber [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(1): 0110003

- (in Chinese).
- 李春生, 颜纷纷, 王大朋, 等. 基于超宽带铒铟共掺光纤光源的光纤光栅传感[J]. 中国激光, 2017, 44(1): 0110003.
- [16] ZHANG G C, MA J, MA L. Effect of spectrum asymmetry of broadband light source on performance of fiber optic gyro[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2017, 25(5): 670-675 (in Chinese). 张桂才, 马骏, 马林, 等. 宽带光源光谱不对称性对光纤陀螺性能的影响[J]. 中国惯性技术学报, 2017, 25(5): 670-675.
- [17] QIAN J R, CHENG X, ZHU B. The experimental research of a broadband erbium-doped fiber superfluorescence source [J]. Chinese Journal of Lasers, 1998, 25(11): 989-992 (in Chinese). 钱景仁, 程旭, 朱冰. 掺铒光纤超荧光宽带光源的实验研究[J]. 中国激光, 1998, 25(11): 989-992.
- [18] WANG X L. Studies of a high efficiency two-stage erbium-doped superfluorescent fiber broadband light source[J]. Journal of Jimei University (Natural Science Edition), 2006, 11(2): 173-176 (in Chinese).
- 王秀琳. 高效率两级结构掺铒光纤超荧光宽带光源研究[J]. 集美大学学报(自然科学版), 2006, 11(2): 173-176.
- [19] HE W, ZHU L Q, ZHANG Y M, *et al.* A high flattening C+L band Er³⁺-doped fiber broadband source with the single pump structure [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2013, 24(12): 2308-2313 (in Chinese). 何巍, 祝连庆, 张荫民, 等. 基于单泵浦源结构的高平坦 C+L 波段掺 Er³⁺ 光纤宽带光源[J]. 光电子·激光, 2013, 24(12): 2308-2313.
- [20] DESURVIRE E, SIMPSON J R. Amplification of spontaneous emission in erbium-doped single-mode fibers [J]. Journal of Lightwave Technology, 1989, 7(5): 835-845.