光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022021801

基于掺铒光纤放大自发辐射的宽带光源优化研究

郝蕴琦[1,2,3]，贾若一[1,2,3]，丁贝贝[1,2,3]，杨　坤[1,2,3]*

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

摘　要： 提出并设计了一种双向泵浦、双程结构的掺铒光纤放大自发辐射宽带光源。对该光源的实现方案和优化效果进行了实验研究，并分析了该光源的输出功率转化效率、光谱平坦度以及工作稳定性。结果表明，和前向泵浦 ASE 输出相比，该结构所产生的宽带光源泵浦转化效率提高 8.24%，在不加任何滤波器条件下 1 525～1 557 nm 之间光谱平坦度提升 1 dB，3 dB 线宽增加 24.56 nm。实现了 1 h 内光功率和光谱的稳定输出，可为光纤传感、光谱分析等领域提供光源。

关键词： 宽带光源；掺铒光纤；放大自发辐射；优化

中图分类号： TN253　**文章编号：** 1001－5868(2022)03－0557－04

Research of Optimized Wide-bandwidth Optical Source with Er^{3+}-doped Fiber Amplified Spontaneous Emission

HAO Yunqi[1,2,3], JIA Ruoyi[1,2,3], DING Beibei[1,2,3], YANG Kun[1,2,3]

(1. College of Physics and Electronics Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, CHN;
2. Henan Key Lab. of Magnetoelectric Information Function Materials, Zhengzhou 450001, CHN;
3. Zhengzhou Key Lab. of Information Optics and Photoelectric Technology, Zhengzhou 450001, CHN)

Abstract: A kind of wide-bandwidth optical source applying amplified spontaneous emission of Er^{3+}-doped optical fiber is proposed, with bi-directional pumping and double-pass configuration. Experiments were performed to verify the proposed scheme, and then the output performance was optimized. The pump efficiency, spectrum flatness and stability were analyzed in detail. The experimental results show that the pump conversion efficiency is increased by 8.24%, the flatness of optical spectrum is improved by 1 dB in 1 525～1 557 nm without any filter, and the output linewidth @3 dB is widened by 24.56 nm. The stable output of optical power and spectrum within one hour is realized, which can provide light source for optical fiber sensing, spectral analysis, etc.

Key words: wide bandwidth optical source; Er^{3+}-doped fiber; amplified spontaneous emission; optimization

0　引言

具有时间非相干性的宽带光源在光纤传感、光谱分析等领域具有重要的应用[1-3]。目前，宽带光源的实现大多利用超辐射发光二极管(SLD)[4]和掺铒光纤放大自发辐射(ASE)[5]。但前者与单模光纤系统耦合困难，限制了它的应用。随着稀土掺杂光纤技术的逐步完善与成熟，利用掺铒光纤放大自发辐射的宽带光源，受到了研究人员的重点关注[6-8]。

对于掺铒光纤 ASE 宽带光源的研究，人们提出

收稿日期：2022－02－18.

基金项目：河南省科技攻关计划项目(212102210031)；河南省高等学校青年骨干教师培养计划项目(2021GGJS092)；郑州轻工业大学青年骨干教师培养对象资助计划项目.

* **通信作者：**杨　坤　**E-mail：**yyyk2002@163.com

了多种结构[9-14]以实现高平坦度、宽带宽和高转换效率的稳定输出。郭小东等采用单程后向泵浦结构，实现了平坦度 1 dB 的高功率宽带光源[9]。但是，ASE 在掺铒光纤前、后两个方向上均有宽带光输出，单程结构仅利用了掺铒光纤中一个方向的自发辐射，为了提高转换效率和降低泵浦功率[10]，同时利用两个方向自发辐射的双程结构被广泛发展[11-14]。何巍等采用光纤反射环实现双程结构，单光源泵谱两段掺铒光纤，获得了高平坦宽带光源[11-12]。Wang 等提出了利用光开关结合光纤反射环，单光源分路后泵浦两段掺铒光纤，实现宽带 C 波段或 L 波段的单独 ASE 宽带输出[13]。但这种结构中，两段光纤不同的长度比例会对光源输出的平坦度产生影响。Tian 等利用附加有 1/4 波片的非线性光纤环形镜，实现了宽带输出[14]，但该反射环中偏振状态的变化影响光源输出强度的稳定性。

本文采用双程双向泵浦结构，利用两个 980 nm 半导体激光器作为双向泵浦光源，1∶1 光纤耦合器构成光纤的反射环将宽带光再次注入掺铒光纤，实现单级掺铒光纤中性能优化的放大自发辐射输出，获得光源输出功率转化效率的提高以及宽带光谱平坦度的提升，并进一步测试该光源的稳定性，为光纤传感和光谱测试技术提供光源。

1 基本理论

铒离子 Er^{3+} 的能级结构如图 1 所示，其基态为 $^4I_{15/2}$，第一激发态为 $^4I_{13/2}$，第二激发态为 $^4I_{11/2}$。激发态 $^4I_{11/2}$ 的寿命很短，仅为几微秒；激发态 $^4I_{13/2}$ 是一个亚稳态，寿命为 10 ms 左右。因此，$^4I_{15/2}$，$^4I_{13/2}$ 和 $^4I_{11/2}$ 构成了典型的三能级结构。在泵浦光作用下，粒子从 $^4I_{15/2}$ 被激发到 $^4I_{11/2}$ 上，之后通过无辐射迅速到 $^4I_{13/2}$，掺铒光纤产生超荧光。由于配位场的作用，Er^{3+} 能级发生 Stark 裂变。$^4I_{15/2}$ 裂变为 8 个子能级，$^4I_{13/2}$ 裂变为 7 个子能级，$^4I_{11/2}$ 裂变为 6 个子能级。$^4I_{13/2}$ 和 $^4I_{15/2}$ 分裂能级中的高能级之间跃迁产生 C 波段 ASE，分裂能级中的低能级之间跃迁产生 L 波段 ASE。$^4I_{13/2}$ 和 $^4I_{15/2}$ 之间跃迁对应的本征荧光谱和增益谱频带较宽，因此形成了宽带光输出。

铒粒子吸收 980 nm 泵浦光之后，在掺铒光纤中产生放大自发辐射。首先在掺铒光纤近端产生 C 波段 ASE，之后 C 波段 ASE 再被掺铒光纤远端的铒离子吸收，作为二次泵浦源，从而产生 L 波段 ASE。由于 L 波段 ASE 用到的是铒粒子增益曲线的尾部，其发射系数和吸收系数均比 C 波段小 3～4 倍。为了获得较大的 L 波段功率，需要较长的掺铒光纤以减小 C 波段和 L 波段之间的落差，但对应会附加出现各种非线性效应以及降低泵浦效率等。随着泵浦功率的增加，掺铒光纤整体对泵浦光的吸收加强，二次吸收过程减弱，所以 C 波段的输出逐渐增强，光谱曲线整体向短波方向移动，光谱平坦度降低。为了获得宽带光源较高的输出功率和较好的光谱平坦度，需要对基于掺铒光纤的光源结构进行优化设计。

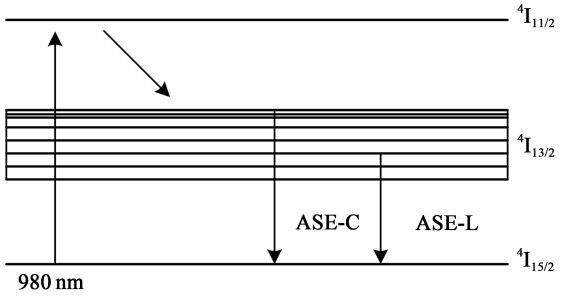


图 1 铒离子能级示意图

2 实验装置

基于双向泵浦、双程结构的掺铒光纤宽带光源结构示意图如图 2 所示。光源以一段 8 m 长的高浓度掺铒光纤(EDFC-980-HA Optical Fiber，Nufern)为核心，其截止波长为 941 nm，模场直径为 5.8 μm，1 530 nm 处波长吸收为 7.11 dB/km，1 200 nm 波长吸收为 11.2 dB/km。两端分别被两个 980 nm 激光(HY-TPL-980-300-B-FA，深圳浩源光电科技公司)P_1 和 P_2 泵浦。P_1 泵浦掺铒光纤时，产生的前向 ASE 直接输出；P_2 泵浦时，后向 ASE 光直接输出。同时，P_1 所对应产生的后向 ASE 和 P_2 对应产生的前向 ASE，经过一个由分光比 1∶1 的 1×2 耦合器构成的光纤环形镜[15]反射，再次经过铒纤放大吸收后，从光源输出端口输出。对于两个泵浦光源而言，均有一个方向(前向或后向)的 ASE 两次经过掺铒光纤，所以构成了双程结构。光纤隔离器用于消除反射，避免形成激光。在该结构中，充分利用了掺铒光纤中的铒粒子，可提高光源的转换效率，提高光谱的平坦性和光源的稳定性。

为了分析该光源的优势，我们将本文所提出的结构与如图 3(a)所示的前向泵浦结构、图 3(b)所示

带光纤反射环的单泵浦前向结构进行比对研究。图中保留右侧的波分复用器(WDM)是为了保证整个光源中的损耗一致。这两种结构中所用 980 nm 泵浦源和掺铒光纤均与图 2 中相同。

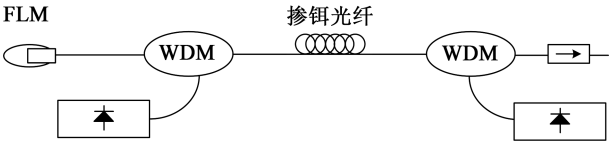
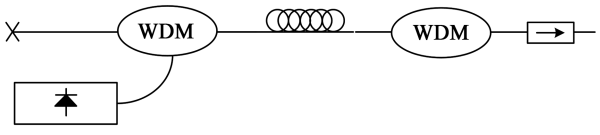
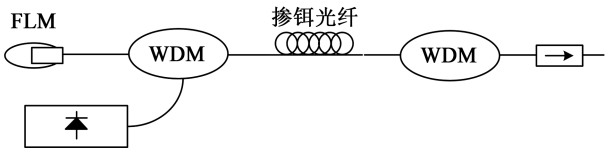


图 2　实验装置



(a)　前向泵浦结构



(b)　带光纤反射环的单泵浦结构

图 3　两种泵浦结构图

3　实验结果与讨论

对三种结构的宽带光源泵浦效率进行了比对研究。三种结构的功率输出拟合曲线如图 4 所示，从图中可以看出，光源输出功率 P_{out} 随着泵浦功率 P_p 的增加而增加，呈线性规律。其中，前向结构的泵浦效率为 0.346%，单泵浦结合光纤反射环结构的泵浦效率为 5.914%，本文所设计结构的泵浦效率为 8.587%。可以看出，本文所用结构的泵浦效率相较前向结构提高了 8.241%。

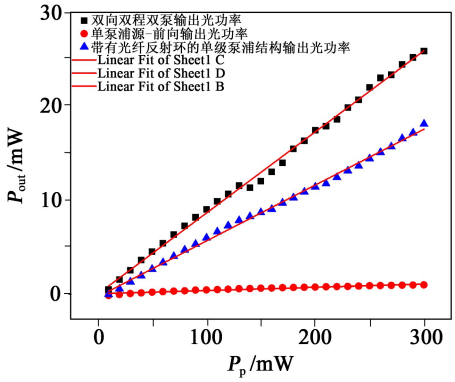


图 4　宽带光源输出功率拟合曲线

对比研究了图 2 和图 3 所示三种结构的 ASE 光源输出光谱，结果如图 5 所示，实验中所用 980 nm 泵浦光源功率均为 30 mW。对于简单的前向泵浦掺铒光纤所产生的光谱，在 1 530 nm 处的峰较高，趋向 1 560 nm 处光强较弱，导致其 3 dB 带宽较低，为 7.8 nm。根据光谱平坦度的计算公式：

$$F=\pm\frac{\left|P_{\max}-\frac{\sum_{i=1}^{N}P_i}{N}\right|+\left|P_{\min}-\frac{\sum_{i=1}^{N}P_i}{N}\right|}{2} \tag{1}$$

可知，在没有添加任何滤波器条件下，1 525～1 557 nm 区间范围内的光谱平坦度为±0.7 dB。

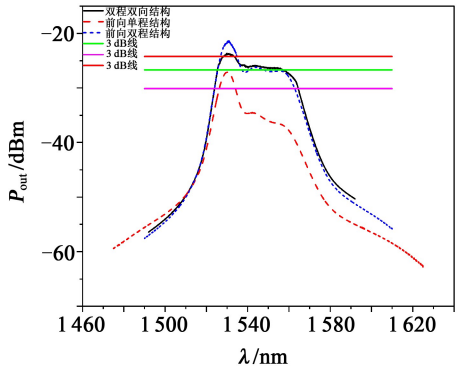
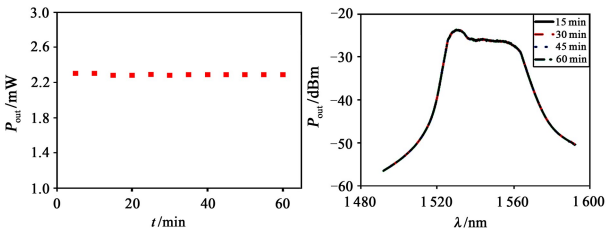


图 5　光谱平坦度对比

对于增加了光纤反射环的单泵谱结构，在掺铒光纤的后向辐射和前向辐射共同作用下，趋向 1 560 nm 的输出功率逐渐增加，1 530 和 1 560 nm 之间的光强落差减小。因此，光源的 3 dB 带宽增加到 7.96 nm，光谱平坦度变好，为±0.47 dB。

对于本文所提的双泵浦结合光纤反射环结构，输出功率进一步向 1 560 nm 处转移，光谱平坦度进一步优化，为±0.2 dB，3 dB 带宽为 32.36 nm。根据上述分析，可知本文所用双泵双程结构的光谱平坦度提高了 1 dB，3 dB 线宽增加了 24.56 nm。

此外，对于本文所提出的 ASE 宽带光源，我们从功率稳定性和光谱稳定性两方面进行了输出稳定性测试。当 P_1 和 P_2 输出功率均为 30 mW 时，该光源输出功率在 1 h 内的波动情况如图 6(a)所示，输出光谱重复性如图 6(b)所示。从图 6(a)可以看出，该光源输出功率波动小于 0.02 mW；从图 6(b)可以看出，在 1 h 内，该光源输出光谱重复性较好。简单的前向泵浦结构受到泵浦光源输出波动和掺铒光纤所处环境的影响，其输出光稳定性降低。实验一般都采用后向泵浦，以降低泵浦光源的影响，在一定程度上提高输出稳定性。本文所提出双向泵浦，前向和后向同时均有 ASE 输出，二者共同作用提高了整个光源输出的稳定性。



(a) 光强稳定性 (b) 光谱稳定性

图 6 光强和光谱稳定性测试结果

4 结论

利用双向泵浦和光纤反射环构成的双程结构，本文获得了泵浦效率提高 8.24%、光谱平坦度提高 1 dB、3 dB 线宽增加了 24.56 nm 的掺铒光纤 ASE 宽带光源，在 1 h 内光强波动小于 0.02 mW，光谱重复性好。本文所提出的宽带 ASE 光源结构可为光纤传感、光纤陀螺、光谱测试等应用提供光源。

参考文献：

[1] 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.
Cao Fan，Shou Guochu，Hu Yihong，et al. Experimental research on crosstalk in a spectrum-spliced DWDM passive optical network[J]. J. of Optoelectronics·Laser，2009，20(8)：1033-1036.

[2] 李春生，颜玢玢，王大朋，等. 基于超宽带铋铒共掺光纤光源的光纤光栅传感[J]. 中国激光，2017，44(1)：01100031-01100036.
Li Chunsheng，Yan Binbin，Wang Dapeng，et al. Fiber Bragg grating sensing by ultra-broadband light source based on Bismuth-Erbium co-doped fiber[J]. Chinese J. of Laser，2017，44(1)：01100031-01100036.

[3] 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.
Zhang Guicai，Ma Jun，Ma Lin，et al. Effect of spectrum asymmetry of broadband light source on performance of fiber optic gyro[J]. J. of Chinese Inertial Technol.，2017，25(5)：670-675.

[4] 訾 慧，薛正群，王凌华，等. 1 550 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)：04200011-04200015.
Zi Hui，Xue Zhengqun，Wang Linghua，et al. Study of wide spectrum superluminescent diode at 1 550 nm[J]. Infrared and Laser Engineering，2018，47(4)：04200011-04200015.

[5] 习聪玲. S+C+L 超宽带光源的研究[J]. 激光技术，2012，36(6)：822-824.
Xi Congling. Study on S+C+L ultra broadband light source [J]. Laser Technology，2012，36(6)：822-824.

[6] Chen Yuee，Zhou Yunkai，Yang Dewang，et al. A temperature-insensitive amplified spontaneous emission broadband source based on Er-doped fiber[J]. Chinese Phys. Lett.，2018，044206：1-3.

[7] Petrov A B，Gumenyuk R，Alimbekov M S，et al. Broadband superluminescent erbium source with multiwave pumping[J]. Optics Communications，2018，413：304-309.

[8] Wu Xu，Ruan Shuangchen，Liu Chengxiang. High-stable and broadband erbium-doped superfluorescent photonic crystal fiber source[J]. Optical Engineering，2012，51(9)：0950051-5.

[9] 郭小东，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)：75-80.
Guo Xiaodong，Qiao Xueguang，Jia Zhen'an，et al. High-power broadband light source for fiber Bragg grating sensors[J]. J. of Transducer Technol.，2005，24(1)：75-80.

[10] Dagenais D M，Goldberg L，Moeller R P，et al. Wavelength stability characteristics of a high-power amplified superfluorescent source [J]. IEEE Lightwave Technol.，1999，17(8)：1415-1421.

[11] 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 Er^{3+} 光纤宽带光源[J]. 光电子·激光，2013，24(12)：2308-2313.
He Wei，Zhu Lianqing，Zhang Yinmin，et al. A high flatting C+L band Er^{3+}-doped fiber broadband source with the single pump structure[J]. J. of Optoelectronics·Laser，2013，24(12)：2308-2313.

[12] Zhu Lianqing，He Wei，Zhang Yinmin，et al. A high flattening C+L band broadband source based on single pump and the same erbium-doped fiber[J]. Optik，2014，125：4659-4662.

[13] Wang Xiulin，Huang Wencai. Band selective C- or L-band ASE source using unpumped erbium-doped fiber with an optical switch[J]. Optics & Laser Technol.，2013，48：263-266.

[14] Tian J J，Yao Y，Sun Y X，et al. Flat broadband erbium doped fiber ASE source based on symmetric nonlinear optical loop mirror[J]. Laser Physics，2010，20(8)：1760-1766.

[15] 习聪玲. 高性能低成本的 C+L 波段掺铒光纤光源[J]. 激光技术，2012，36(1)：138-140.
Xi Congling. Low cost high capacity C+L broad bandwidth erbium-doped fiber source[J]. Laser Technology，2012，36(1)：138-140.

作者简介：

郝蕴琦(1985—)，女，河南省扶沟市人，博士，副教授，研究方向为光纤传感技术；

杨 坤(1980—)，男，河南省永城市人，教授，研究方向为光学测量技术。