

文章编号:1001-5078(2025)03-0331-05

· 激光器技术 ·

环形掺铒光纤放大器对 ASE 噪声抑制研究

罗代树, 赵 鸿, 眭晓林, 刘 波, 吴姿妍, 张奕康
(固体激光技术重点实验室, 北京 100015)

摘要:放大的自发辐射(ASE)是光纤激光器中不可避免的效应,它不仅降低 $1.5\ \mu\text{m}$ 激光的泵浦转换效率,还限制 $1.5\ \mu\text{m}$ 激光功率提升。为了降低输出信号中ASE噪声能量,本文提出了一种新型光纤激光放大系统结构,基于 1×2 AOM对信号光循环泵浦放大,利用OptiSystem软件进行了连续和脉冲信号的仿真。对比基于MOPA结构的脉冲光纤放大器,在信号光为连续信号,功率为 $-30\ \text{dBm}$,泵浦能量为 $350\ \text{mW}$ 时,噪声功率下降 $1.7\ \text{dB}$,而在信号光为脉冲信号,功率为 $-30\ \text{dBm}$,泵浦能量为 $600\ \text{mW}$ 时,噪声功率下降 $1.27\ \text{dB}$ 。

关键词:放大自发辐射;掺铒光纤;噪声抑制;OptiSystem

中图分类号:TN248;TN929.1 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2025.03.002

Research on ASE noise suppression using annular erbium-doped fiber amplifier

LUO Dai-shu, ZHAO Hong, SUI Xiao-ling, LIU Bo, WU Zi-yan, ZHANG Yi-kang
(Key Laboratory of Solid State Laser Technology, Beijing 100015, China)

Abstract: Amplified spontaneous emission (ASE) is an unavoidable effect in fiber lasers, which not only reduces the pumping efficiency of $1.5\ \mu\text{m}$ laser, but also limits the power enhancement of $1.5\ \mu\text{m}$ laser. In order to reduce the ASE noise energy in the output signal, a new fiber laser amplification system structure is proposed, based on the 1×2 AOM for signal optical cycling pumping amplification, and the simulation of continuous and pulsed signals is carried out using OptiSystem software. Compared with the pulsed fiber amplifier based on MOPA structure, the noise power decreases by $1.7\ \text{dB}$ when the signal light is a continuous signal with a power of $-30\ \text{dBm}$, and a pump energy of $350\ \text{mW}$, while the noise power decreases by $1.27\ \text{dB}$ when the signal light is a pulse signal with a power of $-30\ \text{dBm}$, and a pumping energy of $600\ \text{mW}$.

Keywords: amplified spontaneous emission; erbium-doped fibers; noise suppression; OptiSystem

1 引言

$1.5\ \mu\text{m}$ 的光纤激光放大器在光通信、中红外激光产生、相干探测和激光雷达系统中具有重要应用^[1]。激光测距是激光技术的常见应用之一,光纤激光器凭借其损耗小,稳定性好,体积小等优点在测距系统中广泛应用。其中 $1.5\ \mu\text{m}$ 波段激光除了上

述优点外,还具有较低的大气传输损耗,能增加系统探测距离^[2-3]。

本文使用掺铒光纤作为增益光纤,它能产生 $1.5\ \mu\text{m}$ 的输出激光。对于波长为 $980\ \text{nm}$ 的泵浦源,掺铒光纤相当于一个三能级的系统。 Er^{3+} 离子通过受激吸收入射波长为 $980\ \text{nm}$ 的光子的能量,

从 ${}^4I_{15/2}$ 能级跃迁到 ${}^4I_{11/2}$ 能级, ${}^4I_{11/2}$ 能级上的粒子很快跃迁到 ${}^4I_{13/2}$ 能级。 ${}^4I_{13/2}$ 跃迁到 ${}^4I_{15/2}$ 很慢,是一个亚稳态。当有 1550 nm 的信号光子输入时, ${}^4I_{13/2}$ 能级的粒子受激辐射,产生和入射光子同频、同相、同方向的光子,入射光就得到放大。当没有信号光子输入时, ${}^4I_{13/2}$ 能级的粒子跃迁到 ${}^4I_{15/2}$,产生自发辐射,其在掺铒光纤中传输(正反两个方向)时也被放大,形成放大的自发辐射(Amplified Spontaneous Emission, ASE)。特别是在输入为脉冲信号时,两个脉冲之间储存的能量被 ASE 提取,消耗大量上层粒子数,导致对信号光增益降低,降低输出信号的信噪比。因此放大的自发辐射是光纤激光器中要解决的难点之一。目前对光纤激光器中 ASE 噪声的抑制大多采用滤波的方法,对滤波器的要求高且滤波器承受功率较小,无法进行高功率滤波^[4]。本文根据实际需求,对泵浦源能量,光纤长度分别仿真,探究其对 ASE 噪声功率的影响,并在基于 1×2 AOM 的改进结构对连续及脉冲信号进行仿真,研究其信号增益及 ASE 噪声能量,从而设计出符合要求的掺铒光纤放大器。

2 仿真实验及优化

根据上节分析,掺铒光纤是三层能级结构, ${}^4I_{11/2}$ 能级粒子寿命很短,只计算 ${}^4I_{15/2}$ 和 ${}^4I_{13/2}$ 能级。考虑放大的自发辐射噪声,此时可以采用 Giles 模型。

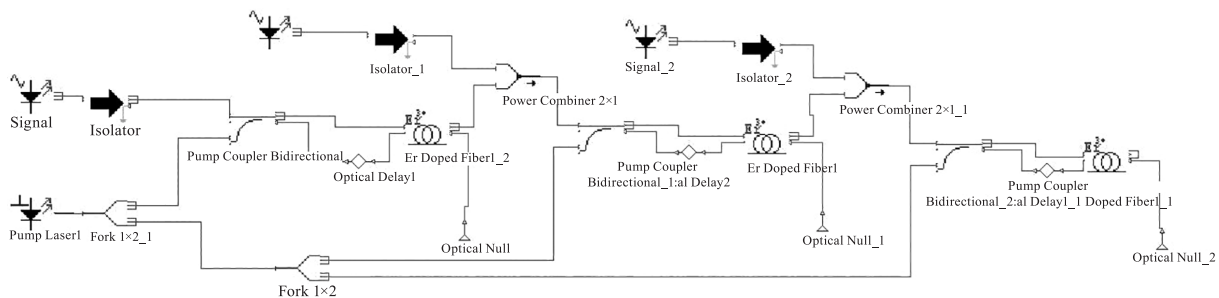


图 2 改进放大系统结构

Fig. 2 Improved amplification system structure

实验中使用器件参数如下:

(1) 信号光源:中心波长为 1550 nm,信号光功率 -30 dBm,信号光为连续光。

(2) 泵浦源:泵浦波长为 980 nm,泵浦能量设计 150 ~ 1000 mW。

(3) 掺铒光纤:长度设计为 1 ~ 20 m 可调,掺杂浓度 800 ppm-wt,纤芯半径 2.2 μm ,数值孔径 0.23。

其中 Optical Null 以及 Optical Delay 为掺铒光

EDFA 的增益大小与铒离子掺杂浓度,铒离子掺杂半径,信号光波长,铒纤长度,泵浦功率等等诸多因素有关,实验中主要关注增益系数和噪声系数。

增益系数定义为^[5]:

$$G(\text{dB}) = 10\lg((P_{\text{out}} - P_{\text{ASE}})/P_{\text{in}}) \quad (1)$$

噪声系数定义为:

$$NF = 10\lg((SNR)_{\text{in}}/(SNR)_{\text{out}}) \quad (2)$$

结合速率方程^[6]:

$$NF = 10\lg\left(\frac{P_{\text{ASE}}}{h\nu_s G \Delta\nu} + \frac{1}{G}\right) \quad (3)$$

改进系统结构如图 1 所示。

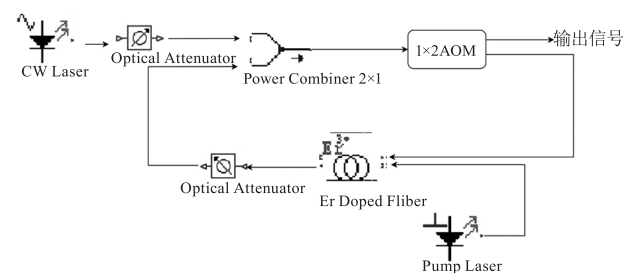


图 1 基于 1×2 AOM 的掺铒光纤放大器

Fig. 1 Erbium-doped fiber amplifier based on 1×2 AOM

实验分为三个部分,首先在仿真中研究光纤长度,泵浦能量对放大效果的影响。由于仿真限制无法写入 1×2 AOM,故用以下结构仿真系统。结构如图 2 所示。

纤在 OptiSystem 中必要的工作条件 Isolator 保障光的前向传输^[7]。

设置信号源功率 -30 dBm,波长 1550 nm,泵浦源功率 350 mW,波长 980 nm,改变泵浦光纤长度得到图 3。

由图 3 可知,第一级增益最高可达 40.1 dB,增益光纤在 9 ~ 15 m 时增益在 38 dB 以上。三级增益最高可达 50.9 dB,增益光纤在 6 ~ 9 m 时增益在

50 dB以上。由于增益光纤和泵浦能量限制,第三级增益光纤在长度为4 m时增益达到最大。根据仿真结果选择三级增益光纤长度分别为11 m,9 m和4 m。设置泵浦能量从150~1000 mW,步进50 mW。得到增益和泵浦能量关系如图4所示。

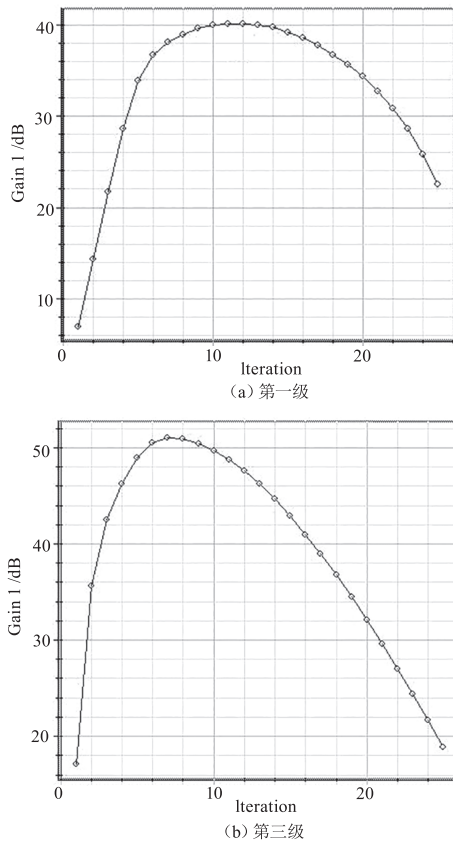


图3 每一级系统增益和掺铒光纤长度关系
Fig.3 The relationship between the system gain and the length of the erbium-doped fiber at each stage

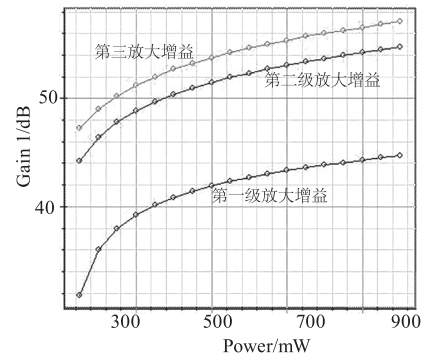


图4 增益和泵浦能量关系

Fig.4 Gain and pump energy relationship

由图5可知,一级放大增益在泵浦能量400 mW时为41 dB,后续增益上升缓慢,可认为达到饱和。二三级放大增益在泵浦能量在150~350 mW时上升较快。取泵浦源350 mW,此时输出信号的噪声功率为19.527 dBm,常规EDDA放大输出信号噪声功率为21.313 dBm,噪声功率下降了1.7 dB。

其次研究在信号源为脉冲信号时,改进系统的放大效果。系统结构如图5所示。

在OptiSystem中仿真器件为理想器件,设置信号源和泵浦源时序相同即可达到同步脉冲目标。设置掺铒光纤长度为11,9和4 m,泵浦能量350 mW,信号光能量-30 dBm。最后得到系统增益为4.92 dB,输出信号噪声功率-14.06 dBm。对比正常系统结构,系统噪声功率下降了0.74 dB。输出信号光谱如图6所示。

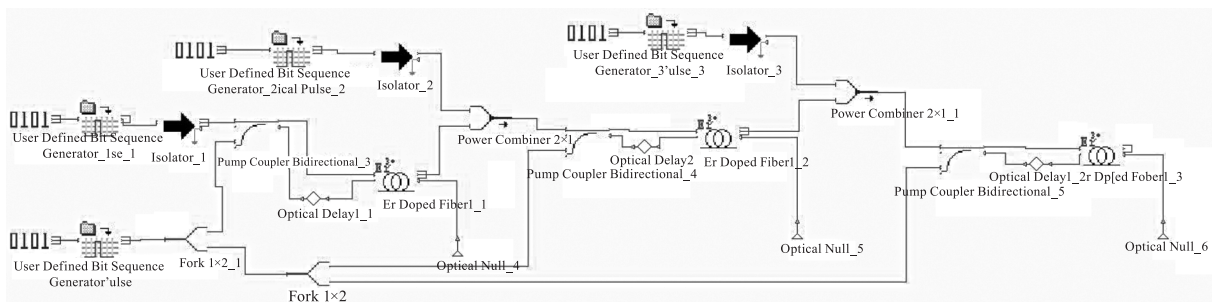


图5 信号与泵浦为脉冲信号时系统结构

Fig.5 The structure of the system when the signal and pump are pulsed signals

最后将连续信号替换为脉冲信号,研究掺铒光纤长度,泵浦能量对改进系统影响。

设置增益光纤长度均为4 m,泵浦源能量200~1000 mW。得到系统增益和泵浦能量关系如图7(a),可以看到泵浦能量在200~600 mW增长较快。

设置泵浦能量为600 mW,增益光纤长度为4~20 m,得到系统增益图7(b),可以看出系统增益在6~7 m达到最高,三级增益分别为25.5 dB,40.07 dB和45.31 dB。

设置泵浦能量为600 mW,增益光纤长度均为

6 m,系统最终增益为 45.14 dB。对比相同条件下常规三级放大得到输出信号噪声光谱如图 8 所示。通过计算得到改进系统输出信号噪声功率为 14.788 dBm,常规放大输出信号噪声功率为 16.066 dBm,噪声功率下降了 1.27 dB。

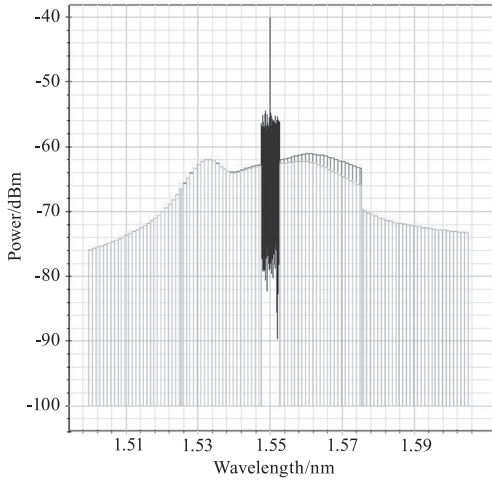
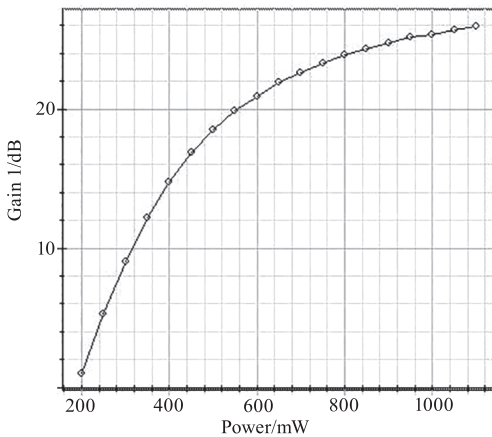
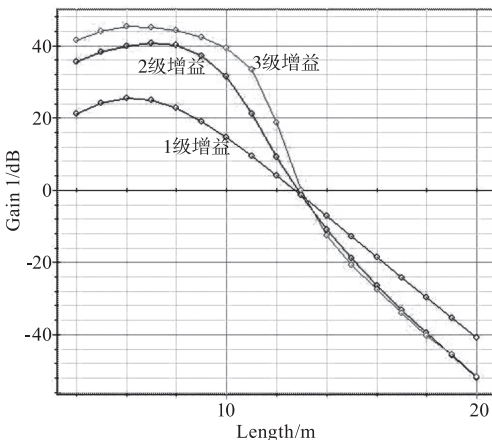


图 6 输出信号光谱图对比

Fig.6 Comparison of output signal spectra



(a) 系统增益和泵浦能量关系



(b) 系统增益和增益光纤长度

图 7 系统增益与泵浦能量及光纤长度关系

Fig.7 System gain versus pump energy and fiber length

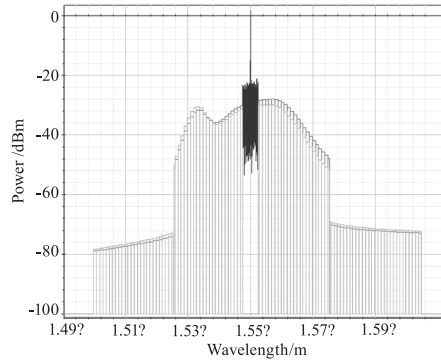


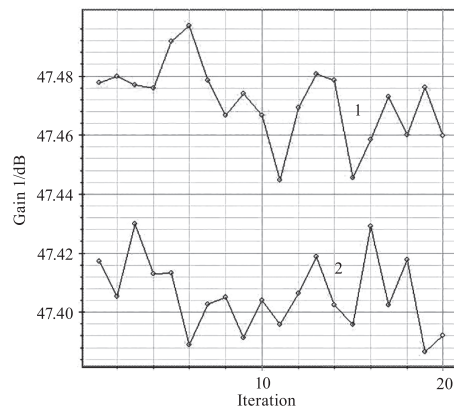
图 8 输出信号噪声光谱对比

Fig.8 Spectral comparison of output signal noise

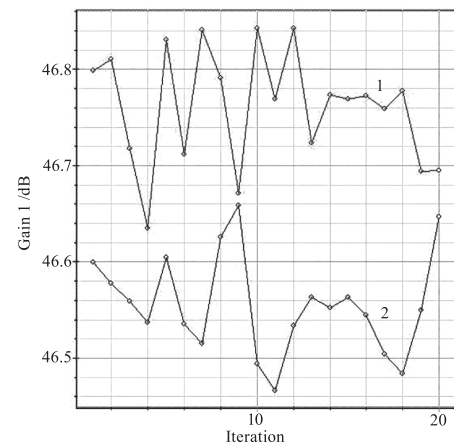
3 实验结果及分析

设置泵浦能量为 350 mW,增益光纤长度分别为 11 m,9 m 和 4 m,输入信号和泵浦皆为连续信号。仿真 20 次后得到系统增益图。可知改进后的信号输出增益比原来大,且输出信号噪声功率得到改善,可见在输入信号及泵浦皆为连续信号时,输出信号噪声功率得到抑制。

设置泵浦源能量为 600 mW,增益光纤长度均为 6 m,输入信号和泵浦皆为脉冲信号。在相同情况下仿真 20 次,得到系统增益如图 9 所示。由图可



(a) 连续信号系统增益图



(b) 脉冲信号系统增益图

图 9 系统总增益图

Fig.9 System total gain diagram

知改进后的系统输出信号增益普遍比常规系统增益高,且改进系统输出信号噪声功率皆比常规放大的输出信号噪声功率低。可见在信号为脉冲情况下,输出信号的自激发噪声得到抑制。

4 总结

本文通过 optiSystem 软件仿真,首先在信号源和泵浦源为连续信号时,得到增益光纤最佳长度及较好的泵浦能量。在增益光纤长度为 11 m,9 m 和 4 m,泵浦能量为 350 mW 时,系统增益为 4.92 dB,输出信号的噪声功率为 19.527 dBm。对比未改进系统,输出信号噪声功率下降了 1.7 dB。其次在信号源和泵浦源为脉冲信号时,改进系统输出信号噪声功率为下降了 1.27 dB。最后在相同条件下,无论是连续信号还是脉冲信号,改进后系统增益都有小幅提升。可见该系统对自激发噪声有抑制效果,能够提高系统增益。

参考文献:

- [1] Hu Liang, Qian Yong, Li Peili, et al. Wide repetition frequency microsecond pulsed fiber amplifier based on acousto-optic modulating mode switching [J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(14): 1401003. (in Chinese)
胡梁, 钱勇, 李培丽, 等. 基于声光调制模式切换的宽重复频率微秒脉冲光纤放大器 [J]. 中国激光, 2023, 50(14): 1401003.
- [2] Wang Fu, Wu Chongqing, Liu Lanlan. Active spontaneous emission in erbium doped fiber with small pulse pump [J]. Acta Optica, 2012, 32(7): 84-90. (in Chinese)
王甫, 吴重庆, 刘岚岚. 小信号脉冲抽运时掺铒光纤自发辐射的研究 [J]. 光学学报, 2012, 32(7): 84-90.
- [3] Cui Yulong, Zhou Zhiyue, Huang Wei, et al. Progress and prospect of mid-infrared fiber laser technology [J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(9): 0900001. (in Chinese)
崔宇龙, 周智越, 黄威, 等. 中红外光纤激光技术研究进展与展望 [J]. 光学学报, 2022, 42(9): 0900001.
- [4] Luo Yi, Wang Xiaolin, Su Rongtao, et al. Research progress on amplified spontaneous emission suppression in pulsed fiber amplifiers [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(2): 020004. (in Chinese)
罗亿, 王小林, 粟荣涛, 等. 脉冲光纤放大器放大自发辐射抑制的研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(2): 020004.
- [5] Chen Lin, Xu Jun, Shao Xiaopeng, et al. Study on noise figure and gain of EDFA [J]. Study on Optical Communications, 2006, 32(1): 52. (in Chinese)
陈琳, 徐军, 邵晓鹏, 等. 掺铒光纤放大器增益和噪声研究 [J]. 光通信研究, 2006, 32(1): 52.
- [6] Wu Zhengguo. Research on key technologies of erbium-doped fiber amplifiers [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019. (in Chinese)
吴正国. 掺铒光纤放大器关键技术研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- [7] Mei Bo, Zhao Xiaolong, Sui Xiaolin, et al. Simulation and experiment of erbium doped fiber amplifier based on small signal amplification [J]. Laser & Infrared, 2023, 53(2): 231-236. (in Chinese)
梅博, 赵晓龙, 眭晓林, 等. 基于小信号放大的掺铒光纤放大器的仿真与实验 [J]. 激光与红外, 2023, 53(2): 231-236.