

引用格式: CHEN Wentao, XU Jianqiu, OUYANG Chunmei. Compact High Power Low Noise Fiber Amplifier for Space Communication[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(4):0414003

陈文韬,徐剑秋,欧阳春梅.用于空间通信的小型化高功率低噪声光纤放大器[J].光子学报,2022,51(4):0414003

用于空间通信的小型化高功率低噪声光纤放大器

陈文韬¹,徐剑秋²,欧阳春梅¹

(1 天津大学 精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072)

(2 苏州市激光智能制造技术研究所, 江苏 苏州 215000)

摘 要:针对空间应用设计了结构紧凑、高功率、低功耗的光纤放大器。在电学设计上,以数字信号处理芯片为核心处理器设计了泵浦源驱动控制系统,形成了输出-检测-再输出的闭环控制逻辑,通过自动功率控制保证输出稳定性,同时降低泵浦源功耗,提升电光效率。在机械设计采用光电分离模块化设计,不仅有利于散热和保持紧凑的结构,而且实现光学部分与电学部分互不干扰,并维持整体重量低于 1 kg。在光学结构上使用两级放大设计,信号光通过掺铒光纤与铥共掺光纤两级放大光路。实验研究了不同泵浦功率、不同光纤长度下放大器的转换效率、功耗以及光谱特性,最终实现了对 1 551 nm 毫瓦级种子光放大至 7.39 W 的保偏信号输出,信噪比保持在 40 dB,整体功耗不超过 80 W,适用于空间通信。

关键词:空间通信;光纤放大器;数值仿真;自动功率控制;掺铒光纤;铥共掺光纤

中图分类号:TN929.11

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20225104.0414003

0 引言

1.5 μm 波段的光纤激光器与放大器具有对人眼无害的优异特性,被广泛应用于空间激光通信、高分辨率传感、激光雷达、光纤通信等领域^[1-6]。研究发现,可以使用拉曼激光器、掺铒光纤激光器(Erbium Doped Fiber Laser, EDFL)以及铥共掺光纤激光器(Erbium-Ytterbium co-Doped Fiber Laser, EYDFL)来产生 1.5 μm 波段的激光^[7-8]。随着航天技术的蓬勃发展,空间通信尤其是微波光传输系统非常需要高功率、高效率的激光器与放大器来满足其速率高、容量大、传输距离长的要求^[9]。星间微波光子系统通过将微波信号调制到激光上来传输到另一颗卫星,信号经远距离传输后损耗很大,需要利用掺铒光纤放大器作为前置放大器来提高信噪比^[10]。要获得较高功率输出,采用更大纤径的增益光纤是最好的选择,但是纯掺铒的光纤激光器的输出功率受到铒离子的聚集和成对诱导的猝灭效应的限制。2014年 KOTOV L V 等使用纤芯直径为 34 μm 的掺铒光纤作为增益介质,在 1 585 nm 波长处获得了功率为 103 W 的单频窄线宽激光输出,但光束质量非常差^[11]。人们通过将铥离子(Ytterbium ion, Yb^{3+})与铒离子(Erbium ion, Er^{3+})共掺杂以增加光纤中铒的掺杂剂浓度来缓解这些问题。2018年, YANG Changsheng 等^[12]利用纤芯直径为 25 μm 的大模场面积铥共掺保偏双包层光纤,获得了功率为 15 W、线宽为 4.5 kHz、偏振消光比大于 23 dB 的 1 603 nm 连续单频激光输出。虽然大纤径光纤拥有更多的掺杂粒子数和更大的泵浦光作用面积,可以获得高功率输出,但由于较差的弯曲特性,需要体积更大的结构来承载^[13]。

在空间应用中,掺铒光纤放大器的转换效率是关键的性能指标,因为这涉及到整个激光放大器的供电效率、散热和体积重量^[14]。掺铒光纤放大器经过多年的发展,要进一步提升其效率需从改进光纤性能、光纤

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 61775159, 61735012)

第一作者:陈文韬(1997—),男,硕士研究生,主要研究方向为高功率光纤激光器。Email: winterchen@tju.edu.cn

导师(通讯作者):欧阳春梅(1980—),女,副教授,博士,主要研究方向为超短脉冲光纤激光器和太赫兹光子学。Email: cmouyang@tju.edu.cn

收稿日期:2021-10-20;录用日期:2021-11-22

<http://www.photon.ac.cn>

器件和泵浦技术方面入手,在综合考虑可靠性和持续性的基础上,寻求提升效率的方法。本文基于自动功率控制的算法设计、模块化的结构设计以及两级放大的光学设计,设计了输出最大功率为 7.39 W 的小型光纤放大器。

1 理论分析

1.1 掺铒光纤放大器

通常情况下,Er³⁺参与受激辐射放大过程的能级有三个:泵浦能级⁴I_{11/2},激光上能级⁴I_{13/2}和基态能级⁴I_{15/2}。由于⁴I_{13/2}能级的低能级一侧没有其它靠得较近的能级,因此具有很长的能级寿命,这部分弥补了Er³⁺的跃迁几率不高的短板,使得Er³⁺可以被低功率的半导体激光器(Laser Diode, LD)进行有效泵浦。对于三能级系统,其粒子数的速率方程为^[15]

$$\frac{dn_3}{dt} = -\frac{n_3}{\tau_3} + \Gamma_{kp}\phi(\nu)\sigma_{ap}(\nu)[n_1 - n_3] \quad (1)$$

$$\frac{dn_2}{dt} = \frac{n_3}{\tau_3} - \frac{n_2}{\tau_2} - \Gamma_k\phi(\nu)[\sigma_e(\nu)n_2 - \sigma_a(\nu)n_1] \quad (2)$$

$$\frac{dn_1}{dt} = \Gamma_k\phi(\nu)[\sigma_e(\nu)n_2 - \sigma_a(\nu)n_1] - \Gamma_k\phi(\nu)\sigma_{ap}(\nu)[n_1 - n_3] + \frac{n_2}{\tau_2} \quad (3)$$

式中, t 表示时间;在各能级上的粒子数分别为 n_3 (泵浦能级)、 n_2 (激光上能级)和 n_1 (激光下能级); τ_3 和 τ_2 分别是泵浦能级和激光上能级的寿命;光子数分布函数 ϕ 是关于频率 ν 的函数,其包含了泵浦光、信号光和放大自发辐射(Amplification of Spontaneous Emission, ASE)的所有光谱成分;泵浦吸收截面 σ_{ap} 、激光吸收截面 σ_a 、激光发射截面 σ_e 都是与其相互作用的激光频率的函数; Γ_k 、 Γ_{kp} 分别表示激光、泵浦光的重叠因子,是考虑光纤中光场分布与掺杂浓度分布重叠效应的等效因子。

1.2 铒镱共掺放大器

Er³⁺在高掺杂时所表现出的能级上转化以及高浓度下Er³⁺之间的强相互作用引起的离子聚集会导致浓度猝灭的缺陷,限制了掺铒光纤放大器输出功率上限。研究表明,在掺杂时加入其他共掺离子可以有效地抑制Er³⁺的聚集^[16]。尤其,将Yb³⁺作为共掺离子时不仅能够避免Er³⁺聚集,而且由于Yb³⁺特殊的能级结构,在Yb³⁺与Er³⁺之间可以产生对应能级结构的能量传递过程,间接地提高了泵浦效率。

在粒子转换过程中,Yb³⁺首先从基态能级²F_{7/2}跃迁到激发态能级²F_{5/2},被激发的部分Yb³⁺会通过自发辐射回到²F_{7/2}能级,部分会通过受激辐射回到²F_{7/2}能级,还有一部分会通过交叉弛豫回到²F_{7/2}能级,同时激发一些⁴I_{15/2}能级的Er³⁺到⁴I_{11/2}能级。由于⁴I_{11/2}能级寿命较短,这些⁴I_{11/2}能级上的Er³⁺又会无辐射跃迁到亚稳态的⁴I_{13/2}能级。在整个过程中,Yb³⁺充当了泵浦光与Er³⁺之间的中间角色,不仅改善了Er³⁺高掺杂时的缺陷,同时由于Yb³⁺的吸收谱比较宽,极大扩展了Er³⁺的泵浦光波长范围。上述过程可以使用描述Yb³⁺和Er³⁺的粒子数密度变化的速率方程来表述,即^[17]

$$\frac{dN_{2,Yb}}{dt} = W_{12,Yb}N_{1,Yb} - W_{21,Yb}N_{2,Yb} - K_{tr}N_{2,Yb}N_{1,Er} - \frac{N_{2,Yb}}{\tau_{Yb}} \quad (4)$$

$$\frac{dN_{2,Er}}{dt} = K_{tr}N_{2,Yb}N_{1,Er} + W_{12,Er}N_{1,Er} - W_{21,Er}N_{2,Er} - \frac{N_{2,Er}}{\tau_{Er}} - C_{up}(N_{2,Er})^2 \quad (5)$$

式中, $N_{1,Yb}$ 、 $N_{2,Yb}$ 为Yb³⁺在基态能级²F_{7/2}和激发态能级²F_{5/2}的粒子数密度;同理, $N_{1,Er}$ 、 $N_{2,Er}$ 为Er³⁺在基态能级⁴I_{15/2}和激发态能级⁴I_{13/2}的粒子数密度; τ_{Yb} 和 τ_{Er} 是自发辐射寿命; K_{tr} 表示交叉弛豫过程的能量转换系数; C_{up} 表示Er³⁺的上转换系数。

速率方程通过受激吸收率 W_{12} 和发射率 W_{21} 来模拟泵浦过程中不同能级上粒子数目的变化,由于Er³⁺其他几个能级的寿命都很短,所以假设上下能级粒子数之和等于总粒子数。 $W_{12,Er}$ 与 $W_{21,Er}$ 表示由信号光引起的Er³⁺在基态能级与激发态能级之间的跃迁概率, $W_{12,Yb}$ 与 $W_{21,Yb}$ 表示由泵浦光引起的Yb³⁺在基态能级与激发态能级之间的跃迁概率,下标1、2分别表示基态与激发态,详细的计算过程为

$$W_{12,Er} = \frac{\Gamma_s\sigma_{as,Er}}{h\nu_s A_c} P_s(z) \quad (6)$$

$$W_{21,Er} = \frac{\Gamma_s \sigma_{es,Er}}{h\nu_s A_c} P_s(z) \quad (7)$$

$$W_{12,Yb} = \frac{\Gamma_p \sigma_{ap,Yb}}{h\nu_p A_c} P_p(z) \quad (8)$$

$$W_{21,Yb} = \frac{\Gamma_p \sigma_{ep,Er}}{h\nu_p A_c} P_p(z) \quad (9)$$

式中, $\sigma_{ap,Yb}$ 与 $\sigma_{ep,Yb}$ 表示 Yb^{3+} 在泵浦波长处的吸收和发射截面, $\sigma_{as,Er}$ 与 $\sigma_{es,Er}$ 表示 Er^{3+} 在信号光波长处的吸收和发射截面; $h\nu_p$ 和 $h\nu_s$ 表示泵浦光和信号光的光子能量; Γ_p 和 Γ_s 表示泵浦光与信号光模场与光纤纤芯掺杂区域的重叠因子; A_c 表示线性掺杂有效面积; P_p 和 P_s 分别表示泵浦光和信号光在光纤中传输距离为 z 时的能量值。

通过速率方程可以分析泵浦光、信号光以及上能级粒子数在增益光纤中的相互作用结果,图1展示了对掺铒光纤和铒镱共掺光纤的数值仿真结果。结果表明,在相同条件下增益光纤的长度与光-光转化效率有直接联系,存在一个最优光纤长度。

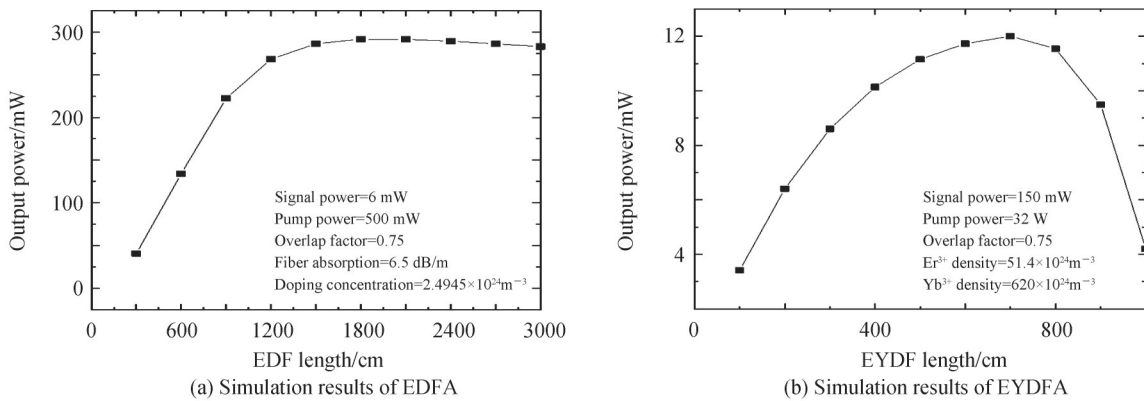


图1 不同长度掺杂光纤输出功率的数值仿真模拟
Fig.1 Numerical simulations of the output power of the doped fibers with different lengths

2 结构与与设计

2.1 光纤放大器结构

研究的光纤放大器结构如图2所示,由种子源输出的激光进入到光纤放大器中,采用两级放大结构对信号光进行功率放大。其中,第一级为预放大级,由1:99保偏耦合器(OC-1)、保偏隔离器(ISO-1)、980 nm 半导体激光器泵浦源(LD1)、保偏波分复用器(WDM)、纤芯直径为 $9 \mu\text{m}$ 的保偏掺铒光纤(EDF)和保偏隔离器(ISO-2)构成;第二级为主放大级,包括四个 940 nm 半导体激光器泵浦源(LD2, 3, 4, 5)和保偏合束器(COM)、纤芯直径为 $12 \mu\text{m}$ 的保偏双包层铒镱共掺光纤(EYDF)、保偏高功率隔离器(ISO-3)以及另一个1:99保偏耦合器(OC-2)。

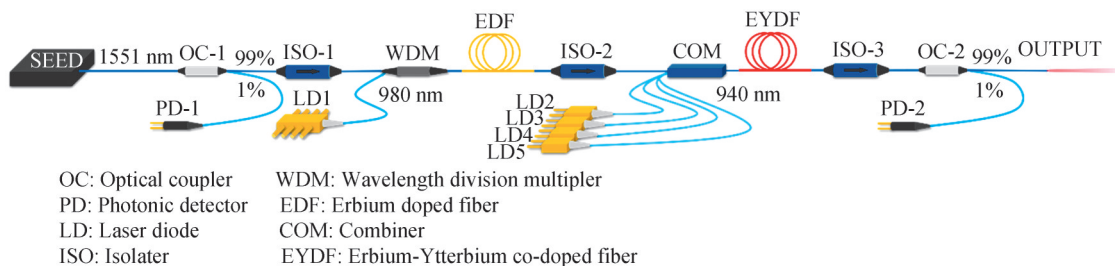


图2 高功率光纤放大器光路结构
Fig.2 High-power fiber amplifier optical path structure

实验中所使用的待放大信号源为一个非保偏单模半导体激光模块,输出功率范围为10 mW,峰值波长为1 551 nm。种子信号光通过FC/APC跳线头输入至放大光路中,输入端耦合器分离1%信号光进入光电探测器(PD-1)进行采样。信号光经过掺铒光纤时,在泵浦光作用下发生受激辐射放大,再经过铒镱共掺光纤进行第二次放大,输出端耦合器同样分离1%的信号光以供采样检测(PD-2)。光路所有的元器件均采用保偏器件,因此能获得稳定的、高信噪比的保偏放大信号输出。实验使用全波段功率计(DHC GCI-08)与光谱仪(ANOD AQ6315E)记录了第一级放大输出与第二级放大输出功率变化以及光谱变化,分析了放大器的优化可能性与优化方向。

2.2 自动功率控制与结构

由于半导体泵浦源电流和温度的任何微小变化都会影响光纤放大器的输出状态^[18],为保证放大器的恒定输出,稳定可靠的泵浦驱动控制电路至关重要。为了提高功率稳定性以及降低整体的功耗,采用了由高速信号处理器芯片控制的驱动系统,以驱动半导体激光器泵浦源稳定高效工作。整体系统组成如图3(a)所示。

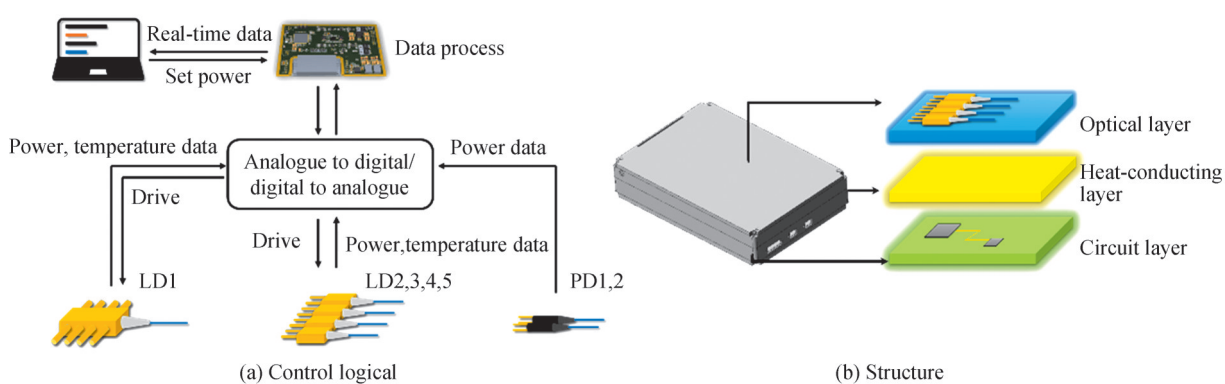


图3 整机控制与结构

Fig.3 Complete machine control and structure

由计算机等设备发出的命令经过数字信号处理芯片(Digital Signal Process, DSP)的处理,通过数字模拟转换电路转化成为注入到泵浦半导体激光器的电流值,并通过电路检测实际电流值返回到DSP中计算处理。驱动系统同时配置了温度传感器及半导体制冷器,实时监测温度数据,半导体制冷器主动制冷以保持泵浦源输出稳定性。入射信号光与输出信号光功率可以通过两个光电探测器(PD1,2)获取,通过实时采样比对算法实现在没有入射光时系统自动待机,维持最小功耗运行。

空间应用中,体积与重量是不可忽略的考量。体积优化是减重的重要手段,除去所有必要的元器件外,重量来自于放大器的外壳、线路等结构,缩减体积于简化结构有利于减轻重量。如图3(b)所示,放大器结构主要由光学层、散热层、电学层组成,光学层包括了所有的光学器件例如泵浦激光器,使得光纤只需要排布在同一水平面上,减少了光纤盘绕的困难,缩小了光纤盘绕所需要的空间体积。散热层上侧为光学模块,下

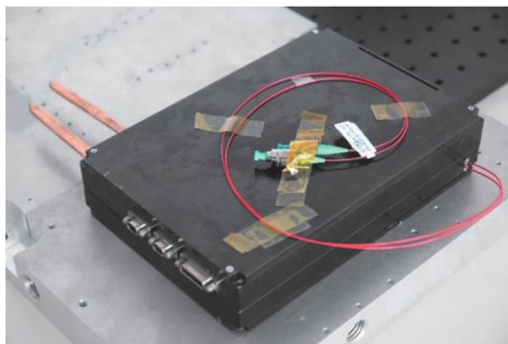


图4 小型化高功率光纤放大器原理样机

Fig.4 Compact high-power fiber amplifier principle prototype

侧为电学模块,散热层内由导热管分布在主要发热器件底部。光学层与电学层安装在散热层正反面,这种光电分离的模块化设计可以有效节约器件占用的空间成本,最终体积长 20 cm、宽 14 cm、高 4 cm。同时考虑到半导体激光器的温度敏感特性以及空间中散热的特殊性,将光学部分与控制驱动部分分别集成在不同的空间内,散热层中的导热管会将产生的热量传递到外接的热处理设备,使得所有器件无需过多考虑散热空间或者增加散热器件,结构更加紧凑,还能保持良好的热量分布。所有器件都通过开槽实现固定,减少螺钉使用量,不带来额外重量,当前机型采用铝合金机壳和不锈钢螺钉,整机重量 0.8 kg,完成电学光学系统组装后的原理样机如图 4 所示。

3 实验结果与分析

3.1 第一级放大测试

第一级光路采用输出波长为 980 nm 的半导体激光器作为泵源,注入电流 1 100 mA 时的输出功率是 619 mW,功耗为 2.41 W,输出波长为 973.9 nm,注入电流与泵浦功率的测试结果如图 5(a)所示。输入信号光峰值波长为 1 551 nm,信噪比为 33.92 dB,测试光谱如图 5(d)中嵌入图所示。在第一级中通过掺铒光纤时在 976 nm 半导体激光器的泵浦作用下经历受激辐射放大,通过隔离器(ISO-2)后输出,不同长度的掺铒光纤下测得的输出结果如图 5(c)所示,不同光纤长度对应的光-光转换效率如图 5(b)所示。

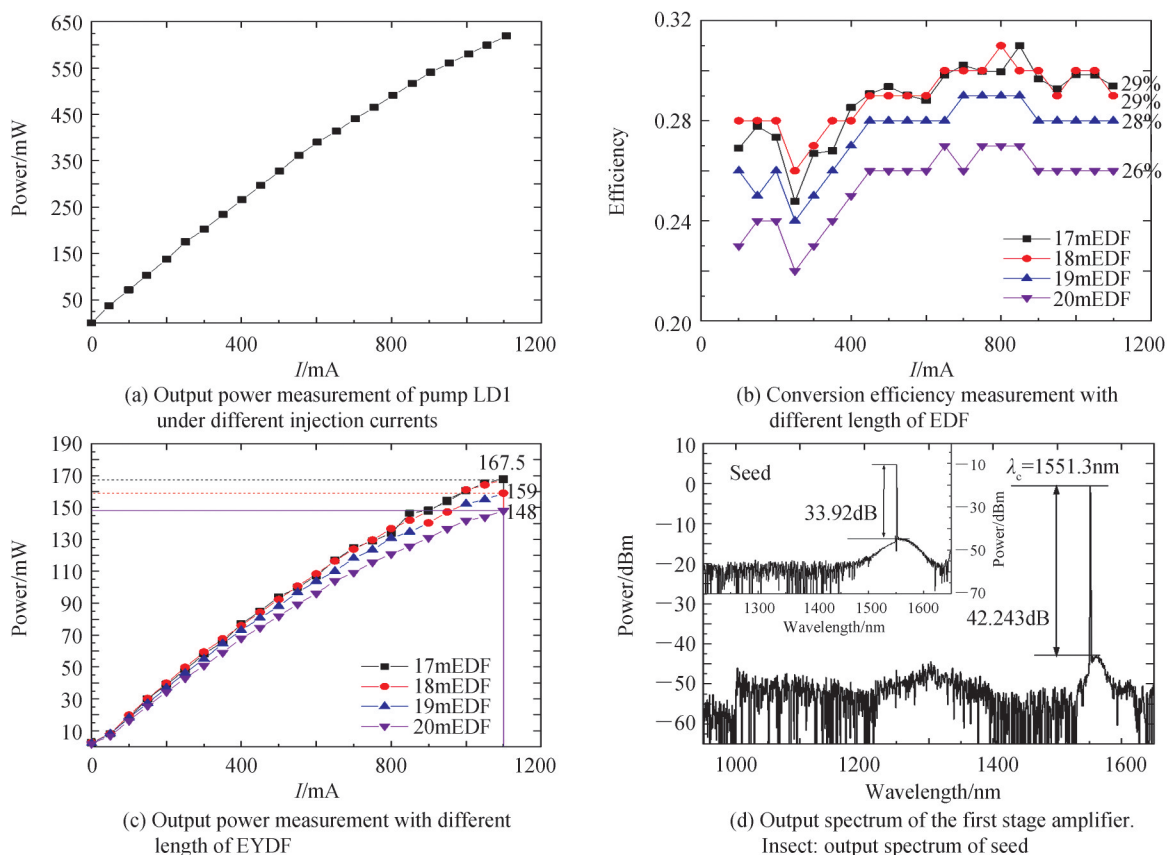


图 5 第一级放大输出

Fig.5 Output of the first stage amplifier

图 5(c)中所示,在超过泵浦 LD 阈值后,输出功率近似线性增加,在 LD 电流达到 1 100 mA 时,18 m 增益光纤对应的输出功率为 167.5 mW。泵浦光与信号光在增益光纤中同时由前向后传输,在传输过程中泵浦光不断被吸收损耗,而信号光不断被放大,如果增益光纤中泵浦光的能量减弱至消失,信号光就不会再被放大,反而会在传输过程中产生一定的损耗。在这种情况下,增益光纤越长,输出功率越低。17 m 增益光纤对应的输出功率为 168.1 mW,相比于 18 m 增益光纤有较小提升,但转换效率没有提升。可知,最优长度应在 17 m 左右,如继续减短增益光纤长度,则增益不能达到饱和状态。因此,选择合适长度的掺铒光纤可以提高

放大过程中的光光转换效率,在最大注入电流作用下,18 m 铒纤所对应的转换效率为 29%。

在后续实验中继续使用 18 m 长度的掺铒光纤,选择 LD1 注入电流为 900 mA,此时第一级输出功率为 147.7 mW,转换效率为 30%,输出光谱如图 5 所示,信噪比为 42 dB,在光谱中除了被放大的信号光,还有许多的 ASE 光谱成分,以及种子源自身的噪声成分,影响了最终的信噪比。

3.2 第二级输出测试

第二级主放大级是第一级输出信号光与四个最大输出功率为 8 W 的 940 nm LD 通过合束器一起耦合进一段铒镜共掺双包层光纤中,经过一个隔离器和耦合器之后获得最终放大输出。四个 LD 在注入电流值为 9 A 时,输出功率达到约 32 W,每个 LD 输出 8 W,此时四个 LD 的功耗为 66.6 W。注入电流与泵浦功率的测试结果如图 6(a) 所示。

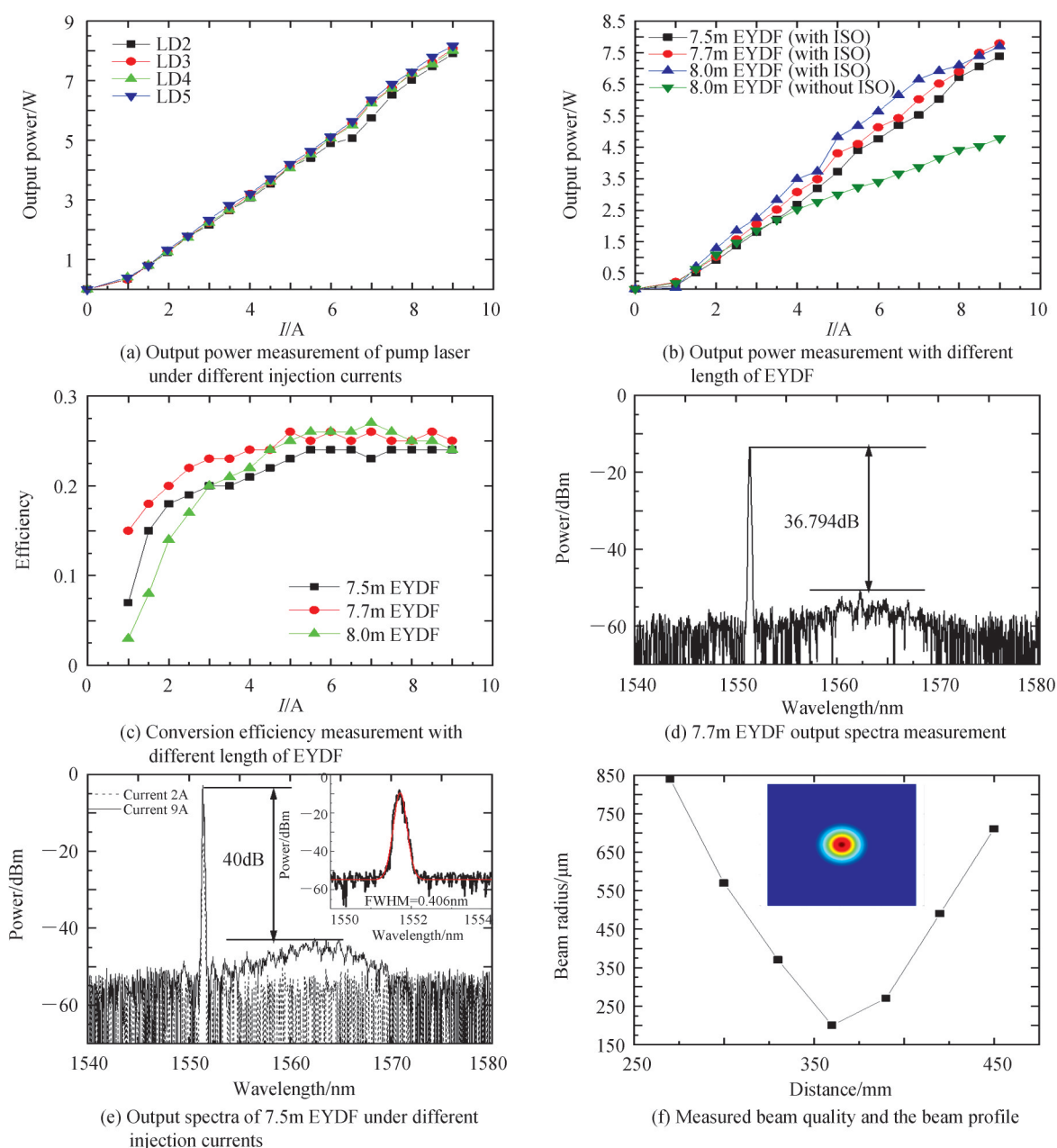


图 6 第二级放大输出

Fig.6 Output of the second stage amplifier

选取不同长度的铒镱共掺光纤,在没有输出隔离器保护与有输出隔离器保护的条件下进行对比实验,输出功率如图6(b)所示。实验表明在输出端接入高功率隔离器可以阻挡输出端回返光导致的寄生振荡,从而抑制放大过程中的增益竞争现象。当铒镱共掺光纤为7.5 m时,最大输出功率为7.39 W;铒镱共掺光纤为7.7 m时,最大输出功率为7.8 W;图6(d)与(e)展示了其最大功率输出光谱测试结果。7.7 m增益光纤长度下拥有更高的增益,但同时ASE噪声也获得了较高的增益,此时信噪比36.79 dB。为了获得良好的增益与信噪比,选择7.5 m的铒镱共掺光纤。图6(e)对比了不同注入电流下的输出光谱,在注入电流逐渐增大的过程中,ASE逐渐增多,在最大9 A的注入电流下,输出信号功率为7.39 W,信噪比为40 dB。此时,整个放大器的功耗为69.01 W。

在实验中,通过保偏种子光进行偏振消光比(Polarization Extinction Ratio, PER)测试,结果表示PER约为17.5 dB,激光输出保持线偏振。最终输出信号的窄谱在图6(e)中的嵌入图给出,将测试数据与高斯曲线拟合,得到输出信号激光的半高全宽(Full Width at Half Maximum, FWHM)为0.402 nm。图6(f)给出了全功率下激光光束质量的测试数据以及二维轮廓图,得到激光光束质量因子 M^2 为1.05。

4 结论

本文通过选取半导体激光器为泵浦源,将两种增益光纤作为增益介质设计了一个拥有预放大级与主放大级的光纤放大器,该放大器可将8.7 mW的1 551 nm输入信号光放大到功率最高为7.39 W的保偏信号输出,并保持40 dB的信噪比,输出激光线宽为0.402 nm,光束质量因子 M^2 为1.05。可以使用计算机改变泵浦源的注入电流,从而改变最终的输出功率。在5 W的输出功率下,整个放大器的功耗不会超过50 W,且整机采用模块化、光电分离式的设计,所采用的器件通过合理摆放可以集成在小空间内发挥作用,结构紧凑体积小,长20 cm、宽14 cm、高4 cm,重量0.8 kg,特别适合在有功耗低、体积小等需求的场合下使用。在不同的应用环境中,可以自由组合电学与光学部分来获得不同的输出性能,对空间激光通信有参考作用。

参考文献

- [1] TAO Kunyu, CAO Zhewei, YANG Qi, et al. Problems and solutions of ultra-high speed digital coherent space laser communication[J]. Optical Communication Technology, 2021, 45(5): 44-49.
陶坤宇, 曹哲玮, 杨奇, 等. 空间超高速数字相干激光通信问题与解决方法[J]. 光通信技术, 2021, 45(5): 44-49.
- [2] GAO Duorui, XIE Zhuang, MA Rong, et al. Development current status and trend analysis of satellite laser communication (invited)[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(4): 0406001.
高铎瑞, 谢壮, 马榕, 等. 卫星激光通信发展现状与趋势分析(特邀)[J]. 光子学报, 2021, 50(4): 0406001.
- [3] GENG C, LI F, ZUO J, et al. Fiber laser transceiving and wavefront aberration mitigation with adaptive distributed aperture array for free-space optical communications[J]. Optics Letters, 2020, 45(7): 1906-1909.
- [4] ZHAO Qilai, ZHANG Zhitao, WU Bo, et al. Noise-sidebands-free and ultra-low-RIN 1.5 μm single-frequency fiber laser towards coherent optical detection [J]. Photonics Research, 2018, 6(4): 326-331.
- [5] GAO Lirun, LI Zhan, ZHANG Wenyan, et al. Enhanced negative group velocity propagation in optical fibers with a hybrid Brillouin lasing resonator[J]. Optics Letters, 2019, 44(20): 5097-5100.
- [6] GAO Lirun, LI Zhan, ZHANG Wenyan, et al. Group velocity control by gain-assisted fiber Mach-Zehnder interferometers [J]. Applied Physics Express, 2019, 12(9): 092006.
- [7] WU H, WANG Z, SUN W, et al. 1.5 μm low threshold, high efficiency random fiber laser with hybrid Erbium-Raman gain[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(4): 844-849.
- [8] SUPRADEEPA V R, NICHOLSON JEFFREY W. Power scaling of high-efficiency 1.5 μm cascaded Raman fiber lasers [J]. Optics Letters, 2013, 38(14): 2538-2541.
- [9] XIAO Yongchuan, WANG Chao, ZHANG Hao, et al. Improvement of transmission efficiency in microwave photonic links using EDFA[J]. Chinese Optics, 2020, 13(5): 995-1000.
肖永川, 王超, 张浩, 等. 光放大器对光载微波信号传输效率的改善[J]. 中国光学, 2020, 13(5): 995-1000.
- [10] ZHU Zihang, ZHAO Shanghong, LI Yongjun, et al. Optimization of optically pre-amplified inter-satellite microwave photonic links[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2013, 24(3): 500-507.
朱子行, 赵尚弘, 李勇军, 等. 带前置光放大的星间微波光子链路性能优化[J]. 光电子·激光, 2013, 24(3): 500-507.
- [11] KOTOV L V, LIKHACHEV M E, BUBNOV M M, et al. Yb-free Er-doped all-fiber amplifier cladding-pumped at 976 nm with output power in excess of 100 W[C]. San Francisco, California, United States, 2014, 8961: 1-6.
- [12] YANG Changsheng, GUAN Xianchao, ZHAO Qilai, et al. 15 W high OSNR kHz-linewidth linearly-polarized all-fiber single-frequency MOPA at 1.6 μm [J]. Optics Express, 2018, 26(10): 12863-12869.

- [13] YU Chunlei, WANG Meng, FENG Suya, et al. Research progress on ytterbium-doped large mode area photonic crystal fibers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(17): 170602.
于春雷, 王孟, 冯素雅, 等. 掺镱大模场光子晶体光纤的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(17): 170602.
- [14] ZHANG Ruofan, ZHANG Wenrui, ZHANG Xuejiao, et al. Research status and development trend of high earth orbit satellite laser relay links[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(5): 0500001.
张若凡, 张文睿, 张学娇, 等. 高轨卫星激光中继链路研究现状及发展趋势[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(5): 0500001.
- [15] GILES C R, DESURVIRE E. Modeling erbium-doped fiber amplifiers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1991, 9(2):271-283.
- [16] KHUDYAKOV M M, LOBANOV A S, LIPATOV D S, et al. Single-mode large-mode-area Er-Yb fibers with core based on phosphorosilicate glass highly doped with fluorine [J]. *Laser Physics Letters*, 2019, 16(2): 025105.
- [17] KARASEK M. Optimum design of Er³⁺/Yb³⁺ co-doped fibers for large-signal high-pump-power applications[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2002, 33(10):1699-1705.
- [18] ZHANG Andi, ZHANG Yanrong, LI Tao. Application of variable domain fuzzy PID control in semiconductor laser temperature control system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(12): 1214003.
张安迪, 张艳荣, 李涛. 论域可变的模糊PID控制在半导体激光器温度控制系统中的应用[J]. *光学学报*, 2021, 41(12): 1214003.

Compact High Power Low Noise Fiber Amplifier for Space Communication

CHEN Wentao¹, XU Jianqiu², OUYANG Chunmei¹

(1 *School of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

(2 *Suzhou Laser Intelligent Manufacturing Technology Research Institute, Suzhou, Jiangsu 215000, China*)

Abstract: With the vigorous development of aerospace technology, space communications, especially microwave optical transmission systems, require high-power, high-efficiency lasers and amplifiers to meet the requirements of high speed, large capacity and long transmission distance in space communications. The inter-satellite microwave photonics subsystem transmits the microwave signal to another satellite by modulating the microwave signal to the laser. The signal loss is very large after long-distance transmission. It is necessary to use a fiber amplifier as a preamplifier to improve the signal-to-noise ratio. The conversion efficiency of the fiber amplifier is a key performance index, which is related to the power efficiency, heat dissipation and weight of the entire laser amplifier. Aiming at the space application of optical fiber amplifiers, the design and experimental research of optical fiber amplifiers with compact structure, high output power and low power consumption have been carried out. In the electrical design, a semiconductor laser drive system with a digital signal processing chip as the core processor is designed, and a closed-loop control logic of output-detection-re-output is formed. Through automatic power control, the stability of the output power of the pump laser is ensured, the power consumption of the pump source during idle time is reduced, and the electro-optical efficiency is improved. The drive system is equipped with a temperature sensor and a semiconductor cooler to monitor temperature data in real time, and the semiconductor cooler will maintain the temperature stability of the pump laser. The powers of the input signal light and the output signal light can be obtained by two photodetectors, and the real-time sampling and comparison algorithm realize the automatic standby system when there is no input, and maintain the minimum power consumption operation. The mechanical design adopts photoelectric separation and modular design. Taking into account the temperature-sensitive characteristics of semiconductor lasers and the particularity of heat dissipation in the space, the optical part and the electronic part are respectively integrated in different spaces. The heat pipe in the heat dissipation layer will transfer the heat generated to the external heat treatment equipment, so that all devices do not need to consider too much heat dissipation space or add the heat sink, keeping the overall structure compact and small, and maintaining good heat distribution. The integrated design reduces fixed parts and keeps the overall weight below 1 kg. The optical structure adopts a two-stage amplification structure design, and the signal light is amplified through the erbium-doped fiber

and erbium-ytterbium co-doped fiber, so that high power output can be maintained while maintaining a high signal-to-noise ratio. Furthermore, this paper studies the output performance of the entire system under different pump powers, and compares the conversion efficiency, power consumption and spectral characteristics of the amplifier under different fiber lengths. In order to obtain a good gain and signal-to-noise ratio, an 18 m long erbium-doped fiber and a 7.5 m erbium-ytterbium co-doped fiber are selected, the output spectrum of the signal light after the two stages are analyzed. Finally, the 1 551 nm milliwatt seed light is amplified to a 7.39 W signal output, and the signal-to-noise ratio is maintained at 40 dB. The output beam quality is 1.05, and the overall power consumption does not exceed 80 W. In this work, all the optical designs use polarization-maintaining devices, and the polarization extinction ratio of the fiber amplifier is 17.5 dB. The computer can be used to change the injection current of the pump source, thereby changing the final output power. All the modules can be specially adjusted according to the environment, and can be flexibly used in various occasions. This compact fiber amplifier is 20 cm long, 14 cm wide and 4 cm high, which is very suitable for space laser communication.

Key words: Space communication; Fiber amplifier; Numerical simulation; Automatic power control; Erbium-doped fiber; Erbium-ytterbium co-doped fiber

OCIS Codes: 060.2310; 060.2320; 060.2330; 060.2410; 060.2605