

环形芯掺铒涡旋光纤的放大特性研究

刘帅帅, 张亮, 魏鹤鸣, 文建湘, 庞拂飞*, 王廷云

上海大学通信与信息工程学院特种光纤与光接入网重点实验室, 上海 200444

摘要 提出了一种基于环形芯结构的掺铒涡旋光纤。针对该涡旋光纤的放大性能, 分析了其高折射率环和掺杂区域宽度对增益性能的影响。仿真结果表明, 该光纤可支持 1~2 阶涡旋光模式, 且 C 波段内的模式增益均高于 35.4 dB。通过搭建实验装置对环形芯掺铒涡旋光纤的放大性能进行了测试。实验结果表明, 在 1530 nm 波长处涡旋光的模式增益最大值高达 32.6 dB。此环形芯掺铒涡旋光纤可广泛应用在长距离、大容量的空分复用光纤通信等领域中。

关键词 光纤光学; 掺铒光纤; 环形芯光纤; 涡旋光模式; 增益

中图分类号 TN253 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/CJL220945

1 引言

近年来, 随着通信技术的快速发展, 网络通信系统的容量需求剧增^[1]。受光纤非线性效应的影响, 传统的单模光纤通信系统的容量已接近香农极限^[2], 因此, 提升光纤通信系统的容量迫在眉睫^[3-4]。空分复用技术有望提高光纤通信容量, 轨道角动量(OAM)复用技术是空分复用技术实现空间信道扩容的方式之一^[5-7]。OAM 复用技术是将光纤中的多个正交模式作为自由度, 且 OAM 模式的拓扑荷值(l)在理论上可以取无穷大, 因此, 利用正交性和无穷性可以极大地提升现有的光纤通信容量和频谱效率^[8-10]。

涡旋光模式放大器作为未来构建涡旋光复用光纤通信链路的关键器件之一, 对于增大传输距离、提升容量至关重要^[11-12]。模式增益是涡旋光模式放大器的一个重要性能指标, 主要取决于泵浦光模场分布、信号光模场分布及铒离子掺杂浓度分布。目前, 涡旋光模式放大器主要是基于环形芯光纤结构的掺铒光纤^[13], 该结构具有与环状 OAM 模场相匹配的光纤剖面结构, 利于涡旋光束的稳定传输, 并缩小了信号光与泵浦光模场之间的差异性, 提高了泵浦光的利用效率^[14-15]。南安普敦大学的 Kang 等^[16]提出了一种中空高折射率差环形芯掺铒光纤, 对环形芯内掺铒层位置和厚度进行了仿真, 在掺杂区域厚度为 3.05 μm 时, 实现了 5~7 阶矢量涡旋光模式增益及差分模式增益的均衡优化设计。华中科技大学的 Ma 等^[17]针对低阶简并涡旋光模式群的复用提出了一种环形芯掺铒光纤(RC-EDF), 通过引入双掺铒层的设计, 调控了涡旋光模式放大的

重叠积分因子, 提升了模式增益, 降低了差分模式增益, 在双层掺杂厚度均为 1 μm 时, 研制出 1~3 阶 RC-EDF, 增益均大于 22.9 dB^[18]。北京交通大学的古皓等^[19]基于超高折射率差($\Delta n=0.07$)RC-EDF 结构, 实现了涡旋光模式复用数量的提升, 同样通过掺杂区域位置来优化重叠积分因子, 进而实现了 1~6 阶涡旋光模式的均衡放大。在少模掺铒光纤中也有类似的掺杂设计思路, 广东工业大学的 Fang 等^[20]通过环形芯内单层掺铒层的优化实现了 LP_{01} 和 LP_{11} 模式的高饱和增益。这些研究工作都是针对多阶涡旋模式的增益及均衡放大提出了掺铒浓度分布的精准设计思路。但是, 在实际掺铒过程中, 受目前掺杂工艺精度的限制, 铒离子掺杂浓度分布与理论设计存在较大的差异^[18], 这在一定程度上影响了涡旋光模式放大性能的提升。

本文提出了一种可以支持 1~2 阶涡旋光模式的高增益的环形芯掺铒涡旋光纤结构, 主要针对目前使用较为广泛的涡旋光模式群的复用进行掺铒光纤的设计和制备研究。一方面, 分析了环形芯掺铒涡旋光纤的环形芯宽度和掺杂区域宽度对其放大性能的影响, 并数值仿真研究了环形芯掺铒涡旋光纤长度和信号光波长对其增益特性的影响, 在光纤长度为 5 m 时, C 波段内 1~2 阶涡旋光模式增益均大于 35.4 dB; 另一方面, 通过搭建实验平台对其放大性能进行了测试, 在 1530 nm 波长处 1~2 阶涡旋光模式增益均大于 32.6 dB。本文在理论设计上简化了铒掺杂因素, 将其设置为均匀分布, 利用现有的掺铒工艺较容易实现该设计方案。

收稿日期: 2022-06-06; 修回日期: 2022-06-27; 录用日期: 2022-07-06; 网络首发日期: 2022-07-16

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1801800)、国家自然科学基金(61635006, 61975113)

通信作者: *ffpang@shu.edu.cn

2 环形芯掺铒光纤的设计与仿真

2.1 环形芯掺铒光纤结构的设计

本文提出了一种阶跃型折射率分布的环形芯掺铒光纤结构,其结构如图 1(a)所示。其中:低折射率区域由纯石英玻璃组成,其纤芯半径为 1.6 μm ,包层半径为 62.5 μm ,低折射率区域的折射率为 1.444;高折射率区域由二氧化锗掺杂二氧化硅组成,其折射率为 1.456;环形芯与包层之间的折射率差为 0.012,铒离子掺杂浓度为 $1.3 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$ 。这些参数为实现 1~2 阶涡旋模式的传输提供了条件。涡旋光模式增益由泵浦光模场分布、信号光模场分布及铒掺杂浓度分布决定,因此本文引入了重叠积分因子(Γ)^[20],其表达式为

$$\Gamma = \int_0^{2\pi} \int_{r_1}^{r_2} I_s(r, \varphi) I_p(r, \varphi) N_0(r, \varphi) r dr d\varphi, \quad (1)$$

式中: $I_s(r, \varphi)$ 为信号光的归一化模场强度分布;

$I_p(r, \varphi)$ 为泵浦光的归一化模场强度分布; $N_0(r, \varphi)$ 为掺杂浓度; r_1 和 r_2 分别为掺杂区域的内径和外径; r 为半径; φ 为方位角。重叠积分因子越大,其有效放大区域越大,从而增益越大。本文分析了环形芯宽度(d)和掺杂区域宽度(w)对重叠积分因子的影响。当掺杂区域宽度 w 为 5 μm 时,重叠积分因子随环形芯宽度 d 的变化如图 1(b)所示,重叠积分因子在环形芯宽度 d 为 5 μm 时达到最优。如图 1(c)所示,当环形芯宽度 d 为 5 μm 时,重叠积分因子随掺杂区域宽度 w 的增大而增大,但随着 w 的进一步增大,重叠积分因子趋于平坦。因此,当 RC-EDF 的环形芯和掺杂区域宽度分别为 5 μm 和 6 μm 时,重叠积分因子达到最优,其折射率分布(RIP)、涡旋光模式($|l|=1\sim 2$)和泵浦光基模(PFM)的归一化强度分布如图 1(d)所示,信号光和泵浦光模式的绝大部分能量均能被限制在环形芯中,可以实现较好的模式增益性能。

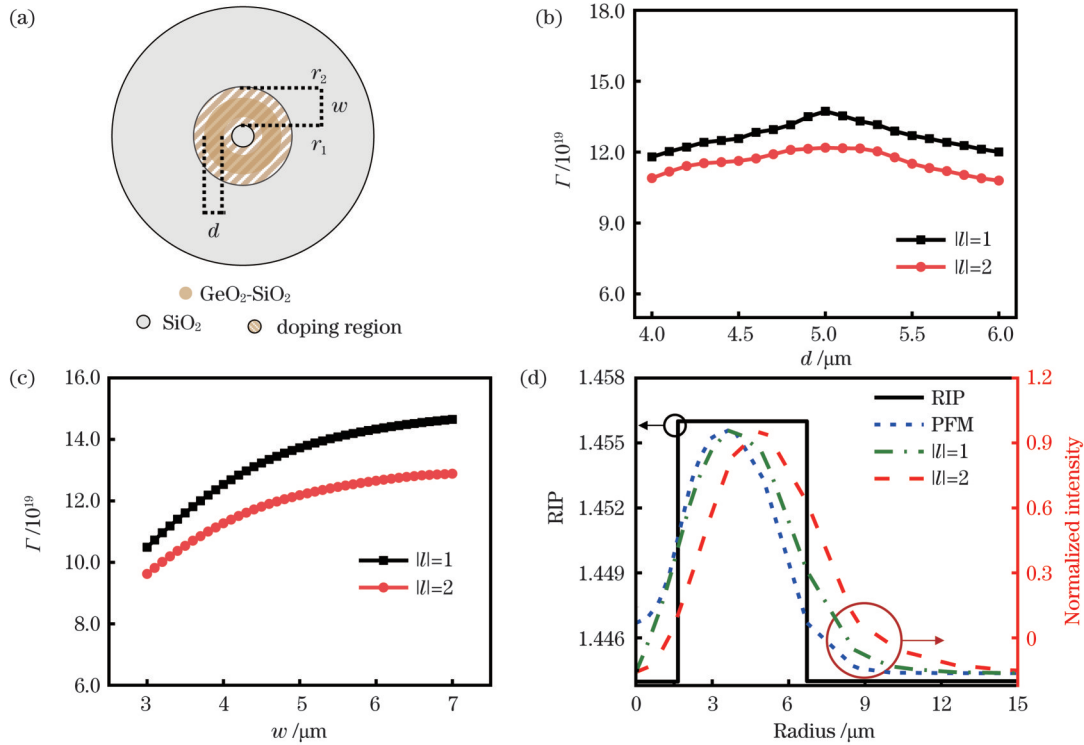


图 1 RC-EDF 的性能表征。(a)设计的 RC-EDF 结构示意图;(b)重叠积分因子随 d 的变化;(c)重叠积分因子随 w 的变化;(d)RIP 及 PFM 与涡旋光模式的归一化强度分布

Fig. 1 Performance characterization of RC-EDF. (a) Structural diagram of designed RC-EDF; (b) Γ versus d ; (c) Γ versus w ; (d) RIP and normalized intensity distributions of vortex modes and PFM

2.2 环形芯掺铒光纤放大性能的仿真分析

本文利用四阶龙格-库塔法对速率方程和功率传输方程进行求解^[19],由此得到 RC-EDF 的放大特性。仿真条件为:上能级寿命为 10 ms;泵浦光吸收截面为 $1.5 \times 10^{-25} \text{ m}^{-2}$;1550 nm 波长处信号光的吸收截面和发射截面分别为 $3.9 \times 10^{-25} \text{ m}^{-2}$ 和 $3.2 \times 10^{-25} \text{ m}^{-2}$;泵浦波长和功率分别为 976 nm 和 800 mW;信号光功率为

— 20.1 dBm。图 2(a)为 1550 nm 波长处 1~2 阶涡旋光模式增益随 RC-EDF 长度的变化,当长度为 5 m 时,涡旋光模式增益达到最优。图 2(b)为 RC-EDF 长度为 5 m 时 1~2 阶涡旋光模式增益随信号光波长的变化,在 C 波段内,1~2 阶涡旋光模式增益均大于 35.4 dB。由图 1(d)可知,泵浦光强度分布和涡旋光信号光强度分布均高度相似,该 RC-EDF 表现出良好的增益特性。

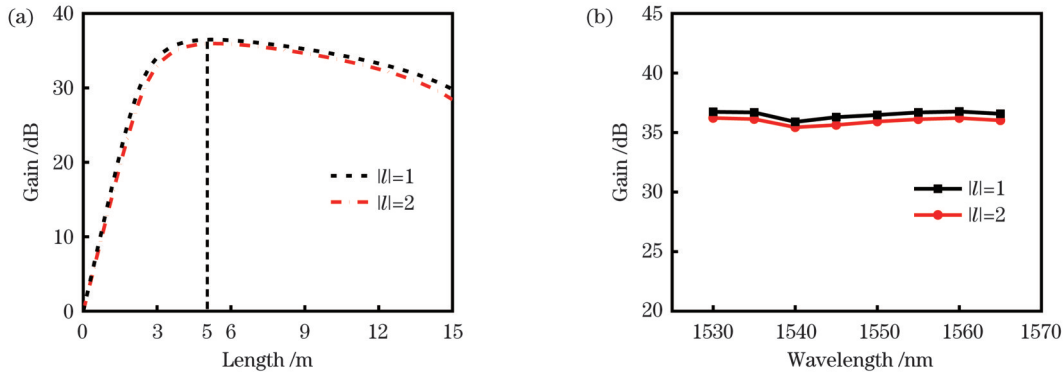


图 2 涡旋光模式增益的仿真结果。(a)增益随 RC-EDF 长度的变化;(b)增益随信号波长的变化

Fig. 2 Simulation results of vortex light mode gain. (a) Gain versus RC-EDF length; (b) gain versus signal wavelength

3 环形芯掺铒光纤的制备及其性能测试

3.1 环形芯掺铒光纤的制备

本文同时采用改进了化学气相沉积工艺与气相高温蒸发沉积工艺制备高浓度掺铒环形芯涡旋光放大石英光纤^[21]。利用团队自制的基于数字全息技术的三维折射率分布分析仪^[22]测试了该 RC-EDF 的折射率分布,如图 3(a)所示,环形芯与包层的折射率差约为 0.0127。光纤中环芯与包层之间的折射率差越大,可支持的涡旋光束的阶次越高,因此,该光纤的折射率差为 1~2

阶涡旋光束的传输提供了条件。光学显微镜观测的 RC-EDF 端面如图 3(a)插图所示,该 RC-EDF 是一种经典的环形芯结构,其中纤芯半径为 1.7 μm ,高折射率环半径为 6.7 μm ,包层半径为 62.5 μm ,与仿真设计参数基本一致。图 3(b)为 RC-EDF 的激发发射光谱和荧光衰减曲线的实验测试结果,激发峰和发射峰分别位于 978 nm 和 1535 nm 处,铒离子的荧光寿命为 10.07 ms。在 1530 nm 处,RC-EDF 的吸收损耗为 12.76 dB/m。该 RC-EDF 中铒的掺杂浓度为 $1.3 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$,比商用 C 波段单模掺铒光纤的掺杂浓度高,其吸收损耗较大,但也有利于实现高增益性能。

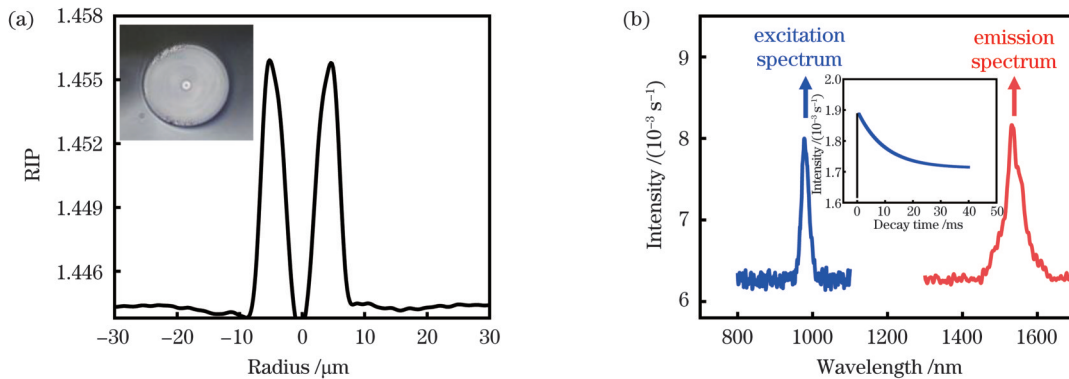


图 3 RC-EDF 的基本特性。(a)RC-EDF 的 RIP(插图为显微镜下的光纤端面);(b)RC-EDF 的激发发射谱(插图为 RC-EDF 的荧光衰减曲线)

Fig. 3 Basic characteristics of RC-EDF. (a) RIP of RC-EDF with end face of optical fiber under microscope shown in inset;

(b) excitation-emission spectra of RC-EDF with fluorescence decay curve of RC-EDF shown in inset

受制备工艺以及环境因素的影响,实验制备得到的 RC-EDF 折射率类似渐变型分布,与理论设计的阶跃型分布略有差别。利用有限元法对该 RC-EDF 所支持的模式进行求解,结果如图 4(a)所示,其中 OAM_0 、 OAM_1 、 OAM_2 分别为 0、1 和 2 阶 OAM 模式。可以看出,在 1530、1540、1550、1560 nm 波长处,该 RC-EDF 可支持 1~2 阶涡旋光模式,且不同模式组的折射率差均大于 10^{-3} ,因此,不同涡旋模式组之间不会发生模式串扰。实验制备的 RC-EDF 的 1~2 阶涡旋光模式和 PFM 的归一化强度分布的仿真结果如图 4(b)所示,泵浦光的归一化强度分布和信号光的归

一化强度分布存在较大的差别。受折射率分布形变的影响,泵浦模式的归一化强度分布发生了改变。

3.2 环形芯掺铒光纤的放大性能测试

图 5 为涡旋光模式光放大测试系统,主要包括涡旋光的产生、放大以及模式检测三个部分。其中,空间光调制器(SLM)能稳定产生任意阶次的涡旋光束,对水平方向的线偏振光的转换效率较高。通过起偏器调控入射光为水平线偏光,可产生高质量的涡旋光束。在 RC-EDF 两端加隔离器以防止光的反射,从而提高放大器的稳定性。二向色镜分别对 1550 nm 和 976 nm 的光进行高透射和高反射。20 倍的物镜将

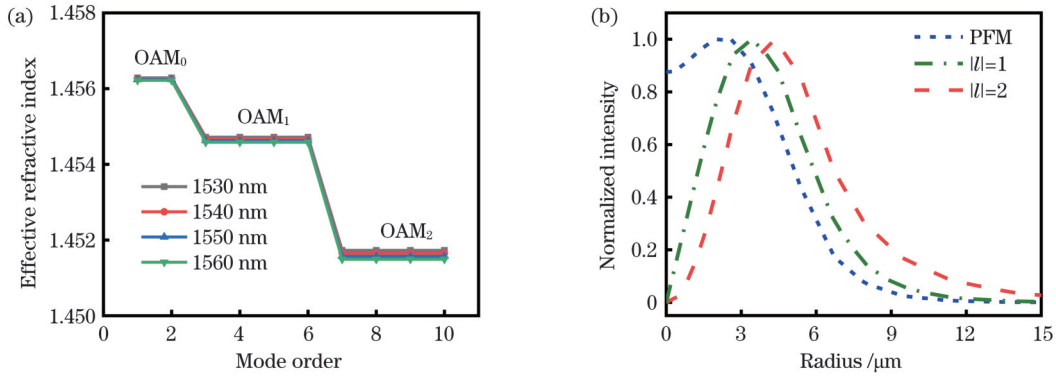


图 4 RC-EDF 的模式特性。(a)不同波长处的模式有效折射率;(b)PFM与涡旋光模式的归一化强度分布

Fig. 4 Modal characteristics of RC-EDF. (a) Effective refractive indexes of modes at different wavelengths; (b) normalized intensity distributions of vortex light modes and PFM

自由空间中的涡旋光耦合进 RC-EDF, 40 倍的物镜收集更多的 RC-EDF 输出的涡旋光。RC-EDF 的输入端面必须平整且光滑以确保高效率的光耦合, 而 RC-EDF 输出端面需具有倾斜度来抑制菲涅耳反射, 从而避免自激现象, 造成放大器输出功率的大幅度减

小。光谱分析仪用于测试放大前、后的输出光谱; 红外相机用于测试涡旋光的光斑质量; 耦合器可将高斯光束分为两束参考光, 一路经 SLM 调制后转换成涡旋光束, 另一路经过透镜后转化为球面波并与涡旋光发生模式干涉。

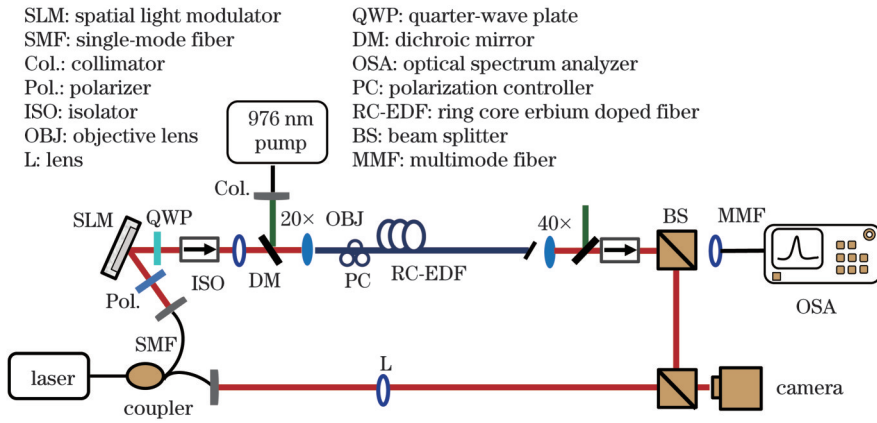


图 5 RC-EDF 的放大性能测试系统的结构示意图

Fig. 5 Structural schematic of test system for amplification performance of RC-EDF

3.3 实验结果与讨论分析

在表征放大性能之前, 需要对 RC-EDF 的传输特性进行测试。当信号光波长为 1550 nm 时在 RC-EDF

的输入和输出端测得的光斑如图 6 所示。图 6(a)、(b) 分布为 SLM 产生的涡旋光及其干涉光斑。图 6(c)、(d) 分别为经过 5 m RC-EDF 传输后的涡旋光及其干

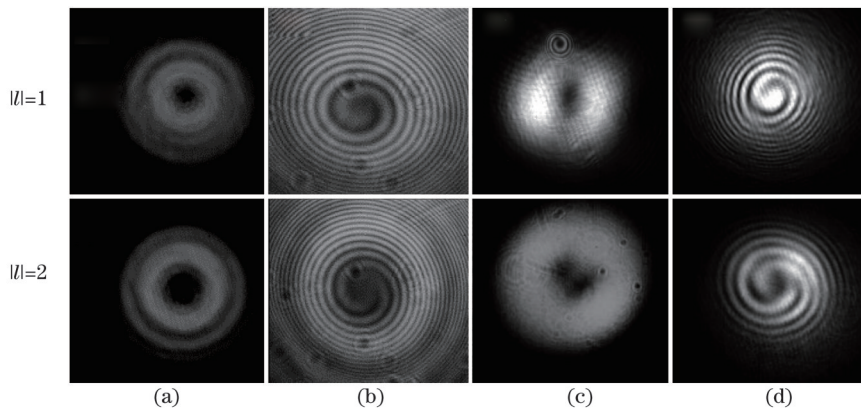


图 6 涡旋光束图。(a)输入端的涡旋光束;(b)输入端的干涉图;(c)输出端的涡旋光束;(d)输出端的干涉图

Fig. 6 Vortex beam diagrams. (a) Vortex beam at input; (b) interference patterns at input; (c) vortex beam at output; (d) interference patterns at output

涉光斑。可以看出,1阶和2阶涡旋光束的场强分布均呈现出“甜甜圈”分布,当它们与球面波发生干涉时,干涉螺旋条纹都比较清晰,且它们的螺旋臂个数分别为1和2。

当输入信号光功率和泵浦光功率分别为 -20.1 dBm和 800 mW时,1~2阶涡旋光模式在C波段的放大特性如图7所示。2阶涡旋光模式典型的放大输出光谱如图7(a)所示,放大的涡旋光模式光谱较为平坦,1阶涡旋光模式也具有相似的放大光谱特性。图7(b)为1~2阶涡旋光模式增益随波长的变化,在C波段内,该

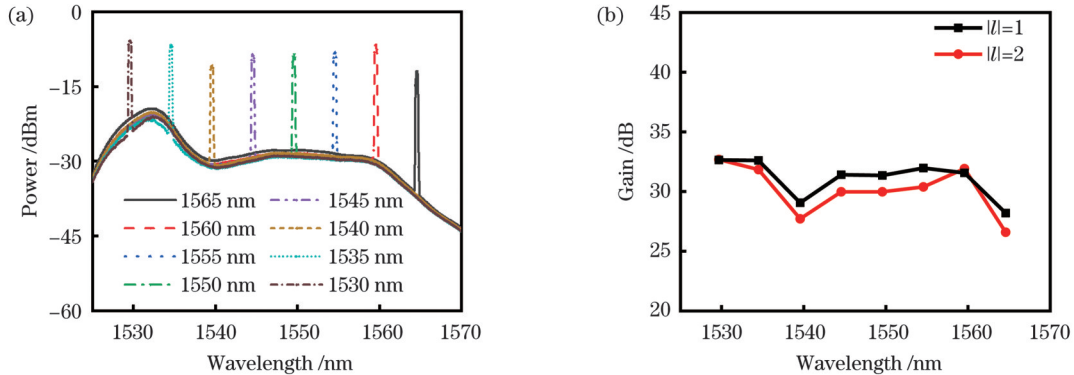


图7 RC-EDF的光谱特性。(a) C波段内的输出光谱;(b)模式增益随波长的变化

Fig. 7 Spectral characteristics of RC-EDF. (a) Measured output spectra in C band; (b) mode gain versus wavelength

设定泵浦功率和信号光波长分别为 800 mW和 1550 nm,本文进一步研究了1~2阶涡旋光模式增益随输入信号光功率的变化。如图8所示,随着信号光功率的增加,模式增益逐渐减小,输出功率不断增加,当输入功率超过 -12 dBm时,输出功率达到饱和,1~2阶涡旋光模式的输出功率分别为 14 dBm和 15 dBm。这主要是由于恒定泵浦光功率引起的粒子数反转数量也是固定的,当信号光功率较小时,反转粒子没被完全消耗掉,增益谱较为平坦;而随着输入信号功率的增加,粒子数反转受信号光的影响明显减弱,从而增益减小,输出功率趋于饱和。当信号光功率为 -23.5 dBm时,1阶和2阶涡旋光模式增益分别为 30.7 dB和 32.3 dB。

与近年来报道的一些涡旋光掺铒光纤的放大特性进行比较,该RC-EDF表现出高增益性能。如表1所

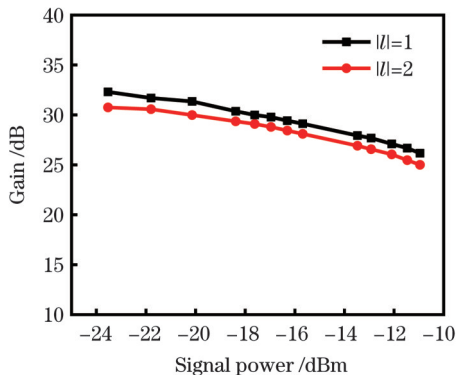


图8 涡旋光模式增益随着输入信号光功率的变化

Fig. 8 Vortex light mode gain versus input optical power

RC-EDF可以实现模式增益均大于 26.6 dB,且差分模式增益小于 1.6 dB;在 1530 nm波长处最大增益均大于 32.6 dB。该实验结果与图3(b)中的理论仿真结果存在一定的差异,这主要是由重叠积分因子引起的。模式增益主要取决于泵浦光模场分布、信号光模场分布和铒离子掺杂浓度分布,比较图1(d)与图4(b)中1~2阶涡旋模式与泵浦模式的归一化强度分布,可以看出,实际制备RC-EDF的泵浦光模式与信号光模式的重叠区域变小,且制备过程中受元素扩散效应的影响,铒离子掺杂分布不均匀,从而导致了较小的增益。

示,目前,实际制备的涡旋掺铒光纤在C波段内的涡旋光模式最优增益均大于 22.9 dB^[18]。本文提出的RC-EDF在C波段内的增益均高于 26.6 dB,表现出优异的放大性能。涡旋光模式增益主要取决于泵浦光模场分布、信号光模场分布及铒离子掺杂浓度分布。在理论设计上,本文简化了铒掺杂因素,将其设置为均匀分布,且优化了环形芯的宽度和掺杂区域宽度以提高重叠积分因子。该设计方案利用现有的掺铒工艺较容易实现。

表1 掺铒涡旋光纤性能对比

Table 1 Performance comparison of erbium-doped vortex fibers

Year	Number of modes	OAM order	Wavelength / nm	Gain / dB	Reference
2017	4	$ l =1$	1530–1565	≤ 19	[15]
2018	4	$ l =1$	1520–1570	≥ 11.1	[23]
2021	14	$ l =0-3$	1540–1560	≥ 22.9	[18]
2022	10	$ l =0-2$	1530–1565	≥ 15	[24]
2022	4	$ l =1-2$	1530–1565	≥ 26.6	This work

4 结 论

设计了一种支持1~2阶涡旋光模式的环形芯掺铒涡旋光纤,并通过优化环形芯宽度和掺杂区域宽度来提高其增益性能。基于优化后的结构参数进行了理论仿真,结果表明,在C波段内,涡旋光模式增益均大于 35.4 dB。对所制备的环形芯掺铒涡旋光纤的性能

进行了实验表征,在 1530 nm 处模式增益均大于 32.6 dB,C 波段内的模式增益均大于 26.6 dB。理论和实验结果的差异性是由折射率的形变和铒离子掺杂分布不均匀导致的。这种高增益的环形芯掺铒涡旋光纤可应用到空分复用光纤通信系统中。

参 考 文 献

- [1] Mecozzi A, Shtaf M. On the capacity of intensity modulated systems using optical amplifiers[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2001, 13(9): 1029-1031.
- [2] Mitra P P, Stark J B. Nonlinear limits to the information capacity of optical fibre communications[J]. Nature, 2001, 411(6841): 1027-1030.
- [3] Narimanov E E, Mitra P. The channel capacity of a fiber optics communication system: perturbation theory[J]. Journal of Lightwave Technology, 2002, 20(3): 530-537.
- [4] 裴丽,李祉祺,王建帅,等.空分复用光纤放大器增益均衡技术研究进展[J].光学学报,2021,41(1):0106001.
Pei L, Li Z Q, Wang J S, et al. Review on gain equalization technology of fiber amplifier using space division multiplexing[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 0106001.
- [5] 乔文,高社成,雷霆,等.轨道角动量模式在柚子型微结构光纤中的传输[J].中国激光,2017,44(4):0406002.
Qiao W, Gao S C, Lei T, et al. Transmission of orbital angular momentum modes in grapefruit-type microstructure fiber[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(4): 0406002.
- [6] Bozinovic N, Yue Y, Ren Y X, et al. Terabit-scale orbital angular momentum mode division multiplexing in fibers[J]. Science, 2013, 340(6140): 1545-1548.
- [7] 叶玉儿,李军依,曹萌,等.双模式涡旋光束的轨道角动量的精确识别[J].激光与光电子学进展,2021,58(18):1811021.
Ye Y E, Li J Y, Cao M, et al. Accuracy recognition of orbital angular momentum of dual-mode vortex beams[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(18): 1811021.
- [8] 靳晓玲,王有为,孙兵,等.环形中空光子晶体光纤用于多阶涡旋光传输[J].中国激光,2021,48(11):1105001.
Jin X L, Wang Y W, Sun B, et al. Annular and hollow-core photonic crystal fiber for propagation of multi-order vorticity[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(11): 1105001.
- [9] Wang J, Yang J Y, Fazal I M, et al. Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing[J]. Nature Photonics, 2012, 6(7): 488-496.
- [10] Ramachandran S, Kristensen P, Yan M F. Generation and propagation of radially polarized beams in optical fibers[J]. Optics Letters, 2009, 34(16): 2525-2527.
- [11] Gregg P, Kristensen P, Ramachandran S. Conservation of orbital angular momentum in air-core optical fibers[J]. Optica, 2015, 2(3): 267-270.
- [12] 阮江冉,裴丽,郑晶晶,等.基于包层泵浦的 4 模掺铒光纤放大器的增益均衡[J].光学学报,2022,42(4):0406001.
Ruan J R, Pei L, Zheng J J, et al. Gain equalization of 4-mode erbium-doped fiber amplifier based on cladding pump[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(4): 0406001.
- [13] Wu Y, He X Y, Wen J X, et al. All-fiber second-order OAM amplifier based on mode selective coupler[C]//2020 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), May 10-15, 2020, San Jose, CA, USA. New York: IEEE Press, 2020.
- [14] Jung Y M, Kang Q Y, Sidharthan R, et al. Optical orbital angular momentum amplifier based on an air-hole erbium-doped fiber[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(3): 430-436.
- [15] Liu J, Wang H Y, Chen S, et al. Demonstration of orbital angular momentum (OAM) fiber amplifier in data-carrying OAM-division multiplexing and wavelength-division multiplexing (WDM) system [C] //2017 Optical Fiber Communications Conference and Exposition (OFC), March 19-23, 2017, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2017.
- [16] Kang Q Y, Gregg P, Jung Y M, et al. Amplification of 12 OAM modes in an air-core erbium doped fiber[J]. Optics Express, 2015, 23(22): 28341-28348.
- [17] Ma J W, Xia F, Chen S, et al. Amplification of 18 OAM modes in a ring-core erbium-doped fiber with low differential modal gain [J]. Optics Express, 2019, 27(26): 38087-38097.
- [18] Zhang X, Liu J, Chen S, et al. Amplification of 14 orbital angular momentum modes in ring-core erbium-doped fiber with high modal gain[J]. Optics Letters, 2021, 46(22): 5647-5650.
- [19] 古皓,汤敏,曹敏,等.基于环形芯光纤的超低差分模式增益涡旋光纤放大器[J].发光学报,2020,41(1):55-62.
Gu H, Tang M, Cao M, et al. Vortex fiber amplifier with ultra-low differential mode gain based on ring core fiber[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2020, 41(1): 55-62.
- [20] Fang Y H, Zeng Y, Qin Y W, et al. Design of ring-core few-mode-EDFA with the enhanced saturation input signal power and low differential modal gain[J]. IEEE Photonics Journal, 2021, 13(4): 7200506.
- [21] 伍淑坚,杜城,罗文勇,等.环形纤芯结构光纤设计与制备技术研究[J].光通信研究,2020(4):31-36,67.
Wu S J, Du C, Luo W Y, et al. Research on design and fabrication technology of annular core structure fiber[J]. Study on Optical Communications, 2020(4): 31-36, 67.
- [22] Yan C, Huang S J, Miao Z, et al. 3D refractive index measurements of special optical fibers[J]. Optical Fiber Technology, 2016, 31: 65-73.
- [23] Wen J X, He X Y, Xing J F, et al. All-fiber OAM amplifier with high purity and broadband spectrum gain based on fused taper vortex-beam coupler[J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(6): 7105308.
- [24] Wu Y, Wen J X, Zhang M D, et al. Low-noise-figure and high-purity 10 vortex modes amplifier based on configurable pump modes[J]. Optics Express, 2022, 30(5): 8248-8256.

Study on Amplification of Ring-Core Erbium-Doped Vortex Fibers

Liu Shuaishuai, Zhang Liang, Wei Heming, Wen Jianxiang, Pang Fufei*, Wang Tingyun

Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China

Abstract

Objective Currently, the information capacity of communication systems based on a single-mode fiber (SMF) is approaching its physical limits. To solve this problem, spatial division multiplexing based on orbital angular momentum (OAM) has been intensively investigated. Theoretically, owing to their orthogonality characteristics, OAM modes can help realize infinite multiplexed channels.

Hence, the capacity and spectrum efficiency of existing optical fiber communication can be enhanced by using the orthogonality and infinity properties of the OAM modes. The vortex mode amplifier is one of the key devices in optical communication systems and is essential for improving the performance of future vortex mode multiplexing systems applicable in long-distance and high-capacity optical fiber communication. Currently, the vortex mode amplifier heavily relies on the ring-core erbium-doped fiber (RC-EDF), which is not only conducive to the stable transmission of the vortex beam but also improves the conversion efficiency of the pump beam. The modal gain is an important index of ring-core erbium-doped vortex fiber amplifiers. Therefore, the design and fabrication of an RC-EDF with a high modal gain are essential to satisfy the growing demand for data traffic.

Methods The modal gain mainly depends on the intensity distribution of the pump and signal modes as well as the doping distribution of erbium ions. The ring core structure is used to optimize the field distribution of the pump modes, thereby improving the conversion efficiency of the pump beam. Owing to the limitations of the doping technology, the doping distribution of erbium ions in actual fabricated fibers differs considerably from that of the theoretical design. Therefore, in this study, we simplify the Er doping factor in the theoretical design to ensure that the doping distribution of the erbium ions is uniform. First, the effects of the doping region and width of the ring core on the gains of the first- and second-order vortex modes are analyzed, and subsequently, these effects are optimized to realize a high-gain ring-core erbium-doped vortex fiber amplifier. According to the relative refractive index profile of the RC-EDF, the modal intensity profiles of the vortex modes ($|l|=1-2$) and the pump fundamental mode (PFM) are numerically simulated using the finite-element method. The effects of the RC-EDF length and signal wavelength on the amplifier gain characteristics are studied using numerical simulation based on the rate and light propagation equations, which guides the optimized fiber parameters in RC-EDF fabrication. Furthermore, an experimental setup is built to characterize the amplification performance of the proposed RC-EDF.

Results and Discussions The proposed RC-EDF has cladding and inner-ring-core radii of $62.5\ \mu\text{m}$ and $1.6\ \mu\text{m}$, respectively. We ensure a large refractive-index difference of 0.012 between the ring core and cladding, which is sufficient to achieve mode splitting. The proposed RC-EDF supports high-order vortex modes ($|l|=1-2$). Modal gains ($|l|=1-2$) are optimal when the thickness of the ring core and the width of the doping region are $5\ \mu\text{m}$ and $6\ \mu\text{m}$, respectively. The simulation results show that the gains of the first- and second-order vortex modes can reach 35.4 dB in the C band [Fig. 2(b)]. The fabricated RC-EDF has a cladding radius of $62.5\ \mu\text{m}$, an inner ring-core radius of $1.7\ \mu\text{m}$, and a ring core thickness of $5\ \mu\text{m}$. Moreover, the refractive-index difference between the ring core and cladding is 0.0127. An experimental setup is built to characterize the amplification performance of the first- and second-order vortex modes in the proposed RC-EDF. Furthermore, an infrared camera is used to detect the output beam profile of the RC-EDF. The results show that the clean vortex modes ($|l|=1-2$) are stably excited and transmitted in the RC-EDF. The maximum gain ($|l|=1-2$) is 32.6 dB at 1530 nm [Fig. 7(b)]. The maximum output power values of the first- and second-order vortex modes are 14 dBm and 15 dBm, respectively (Fig. 8). The fabricated RC-EDF has a small overlap area between the pump and signal modes, and the doping distribution of the erbium is uneven, which causes the gains to be different in the theoretical calculations and experimental measurements.

Conclusions In this study, a ring-core erbium-doped fiber that supports the first- and second-order vortex modes is designed, and modal gains ($|l|=1-2$) are improved by optimizing the thickness of the ring core and the width of the erbium-doping region. Based on these optimized parameters, we perform a theoretical simulation and find that the vortex mode gains are higher than 35.4 dB in the entire C band. The performance of the fabricated RC-EDF is experimentally characterized. The gains of the vortex modes ($|l|=1-2$) are higher than 32.6 dB at 1530 nm wavelength. The proposed high-gain vortex mode amplifier based on the ring-core erbium-doped fiber is expected to be widely used in long-distance and large-capacity spatial division multiplexing fiber communications.

Key words fiber optics; erbium-doped fiber; ring-core fiber; vortex light mode; gain