

激光与光电子学进展

基于 PbSe 量子点掺杂环形芯光纤的涡旋模式放大

郭恒菲^{1,2}, 韦绘梅^{1,2}, 陈娜^{1,2}, 董艳华^{1,2}, 文建湘^{1,2}, 商娅娜^{1,2*}, 陈振宜^{1,2}, 庞拂飞^{1,2}¹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;²上海大学特种光纤与先进通信国际合作联合实验室, 上海 200444

摘要 采用改进的化学气相沉积法成功制备了 PbSe 量子点掺杂环形芯光纤, 光纤为双包层结构, 其环形芯与内包层折射率差约为 2.2%。通过电子探针显微分析技术测试了光纤中的元素种类及含量, 在高分辨透射电子显微镜下观测到 PbSe 量子点的晶格结构, 同时测量了拉曼光谱, 证明此环形芯光纤中成功掺入 PbSe 量子点。这为制备半导体量子点掺杂光纤提供了重要的参考价值。利用该光纤搭建了涡旋光放大系统, 在信号光波长为 1550 nm 处实现了 1~3 阶涡旋模式放大, 当泵浦光功率为 634 mW 时, 所有模式的开关增益 > 13 dB, 差分模式增益 < 2.45 dB。该实验系统有望促进涡旋模式宽带放大的进一步研究。

关键词 光纤光学; PbSe 量子点; 环形芯光纤; 改进的化学气相沉积法; 涡旋模式; 增益特性

中图分类号 TN253

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP231164

Vortex Mode Amplification Based on Ring-Core Fiber Doped with PbSe Quantum Dots

Guo Hengfei^{1,2}, Wei Huimei^{1,2}, Chen Na^{1,2}, Dong Yanhua^{1,2}, Wen Jianxiang^{1,2}, Shang Yana^{1,2*}, Chen Zhenyi^{1,2}, Pang Fufei^{1,2}¹Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China;²Joint International Research Laboratory of Specialty Fiber Optics and Advanced Communication, Shanghai University, Shanghai 200444, China

Abstract The PbSe quantum dot-doped ring-core fiber is successfully prepared using a modified chemical vapor deposition method. The fiber has a double-clad structure, with a refractive index difference of approximately 2.2% between the ring core and the inner cladding. The types and contents of elements in the fiber are verified via electron probe microanalysis. The crystal structure of PbSe quantum dots is examined using a high-resolution transmission electron microscope, and the Raman spectrum is measured. The results proved that PbSe quantum dots were doped successfully into the ring-core fiber. This provides an important reference value for preparing semiconductor quantum dot-doped fiber. The PbSe quantum dot-doped ring-core fiber is the foundation for the vortex mode amplification system. The first- to third-order vortex amplifying modes are realized at 1550 nm. When the pump power is 634 mW, the on-off gains of all modes are greater than 13 dB, and the differential mode gains are less than 2.45 dB. This experimental system is expected to promote further research on vortex mode broadband amplification.

Key words fiber optics; PbSe quantum dots; ring-core fiber; modified chemical vapor deposition; vortex mode; gain characteristic

1 引言

在光通信领域中, 光纤放大器是一种不可或缺的中继器件, 其带宽和信噪比是影响整个光通信系统传

输容量的关键参数, 实现超带宽、低噪声的光纤放大器对于促进大容量光通信发展具有重要意义。涡旋光束由于携带轨道角动量(OAM), 也称为 OAM 光束^[1-2]。运用不同 OAM 模式间的相互正交性实现信息编码和

收稿日期: 2023-04-24; 修回日期: 2023-05-17; 录用日期: 2023-05-26; 网络首发日期: 2023-07-12

基金项目: 国家自然科学基金(62027818, 61975108)、高等学校学科创新引智计划(D20031)

通信作者: *ynshang@shu.edu.cn

模分复用,可以增加信息传输维度,从而增大通信系统容量,因此将涡旋光束和光纤放大器相结合进行研究,有利于促进长距离光通信的发展^[3-4]。

稀土元素掺杂涡旋光纤放大器一直在光通信领域具有广泛的应用,其中掺铒涡旋光纤放大器最为典型^[5]。且由于环形芯光纤具有与 OAM 模式模场相兼容的环形分布,在理论和实验上已经被证明可以降低差分模式增益(DMG)^[6-8]。因此稀土元素掺杂和环形芯结合将有利于涡旋光束的稳定传输。2019年, Ma 等^[9]提出了一种双层掺铒环形芯涡旋光纤放大器,内外环区加入不同掺杂浓度的铒离子,在理论仿真中,所有 22 种模式下都能获得超过 21.5 dB 的增益,DMG 低于 0.27 dB。2021年, Zhang 等^[10]提出的环形芯掺铒光纤可支持 14 种 OAM 模式传输,并在 1550 nm 波长下获得 33.4 dB 的模式增益和小于 1.8 dB 的 DMG。2022年, 刘帅帅等^[11]提出的环形芯掺铒光纤放大器,支持具有拓扑电荷($|l|=1\sim 2$)的 OAM 模,在 C 波段内,所有信号模式的最大增益都达到了 26.6 dB,DMG 保持在约 1.6 dB 以下。由于铒离子的能级固定,无法进行带隙调谐,掺铒光纤放大器的带宽无法进一步提高^[12]。而 IV-VI 族半导体量子点具有光谱覆盖范围广、量子限域效应明显以及吸收-发射光谱可调等特点^[13],例如 Pb 基硫属族量子点(PbS、PbSe、PbTe),具有相对较大的玻尔半径,量子限域效应明显,可调谐发射光谱覆盖近红外区域等优点^[14-16],引起了研究者的注意。其中, PbSe 量子点(QDs)玻尔半径为 46 nm,而 PbS 量子点玻尔半径为 18 nm, PbSe 量子点能够产生较强的量子限域效应,具有较高的量子产率和较低的激发阈值优势,从而 PbSe 量子点成为光纤放大器的候选增益介质^[17-18]。2010年, Watekar 等^[19]采用改进的化学气相沉积(MCVD)法制备了 PbSe 量子点掺杂石英玻璃光纤,并在 1021、1093、1351 nm 处观测到吸收峰,使用透射电子显微镜对预制棒切片进行观测,观察到平均直径小于 5 nm 的量子点。2012年, 许周速等^[20]采用高温熔融-热处理法,以 ZnSe 作为 PbSe 量子点的硒源,成功制备了较高浓度的 PbSe 量子点硅酸盐玻璃,该 PbSe 量子点玻璃,可用来进一步制备超带宽、高增益的红外光纤放大器。2017年, Cheng 等^[21]将 PbSe 量子点掺入紫外固化胶制成了 PbSe 量子点掺杂光纤,实验证明了 PbSe 量子点掺杂光纤放大器具有超宽带和低噪声特性。2020年, Zhang 等^[22]考虑荧光寿命、吸收和发射截面、斯托克斯位移等参数的影响,对 PbSe 量子点的发射特性进行了理论仿真。2022年, 王伟等^[23]利用管内熔融法成功制备了全固态 PbSe 量子点掺杂玻璃光纤,获得了覆盖 1.8~2.8 μm 的宽带可调谐发射,有望用于宽带可调谐中红外光源。这些研究为设计和开发高性能的 PbSe 量子点掺杂光纤放大器提供了理论依据和实验参考,但是目前关于将 PbSe 量子点与涡旋光纤放大器相结合来实现涡旋模式宽带放大的研究较少。

为此,本文采用 MCVD 法,制备了具有双包层结构的 PbSe 量子点掺杂环形芯光纤,利用电子探针扫描分析、高分辨透射电子显微镜以及拉曼光谱仪验证了 PbSe 量子点在该制备环形芯光纤中的存在。且基于该光纤搭建了涡旋光放大系统,研究了 1~3 阶涡旋模式的增益特性。

2 PbSe 量子点掺杂环形芯光纤

2.1 PbSe 量子点掺杂环形芯光纤的制备

整个 PbSe 量子点掺杂环形芯光纤的制备主要分为两步:光纤预制棒的制备和对预制棒进行拉丝。本文所采用的 MCVD 法具有制备光纤成本低、设备简单稳定、折射率分布能精准控制、可用于制备较复杂折射率分布光纤的优势。采用 MCVD 法制备 PbSe 量子点掺杂光纤预制棒的主要流程如图 1 所示。首先,使用氢氧焰作为热源,高温均匀加热高纯度石英基管,温度升至 1700~1900 $^{\circ}\text{C}$,保证后续进入基管中的化学气体有足够的热量进行化学反应。然后,利用 O_2 作为载体将气化后的 SiCl_4 和硼化物通入基管中,高温下发生氧化反应,在基管内壁沉积掺有硼化物的内包层。其次,气化后的 SiCl_4 、 GeCl_4 和经过高温蒸发气化的 PbSe 材料也进入石英基管,经过化学反应生成 SiO_2 、 GeO_2 和 PbSe 混合物沉积在内包层内壁,形成高折射率环层。然后,再次引入气化后的 SiCl_4 和硼化物,用于沉积低折射率芯层。最后,将温度升高至 2000 $^{\circ}\text{C}$,采用塌缩工艺制成实心的预制棒芯棒,再利用拉丝塔将预制棒拉丝为直径约为 125 μm 的光纤。在光纤表面涂覆聚合物涂层,提升光纤的机械性能,最终得到 PbSe 量子点掺杂环形芯光纤^[24]。

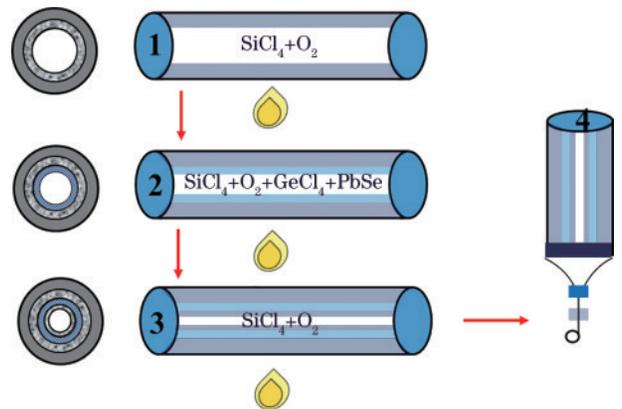


图 1 PbSe 量子点掺杂环形芯光纤制备流程图

Fig. 1 Preparation flow chart of PbSe quantum dot-doped ring-core fiber

本文设计的 PbSe 量子点掺杂环形芯光纤采用双包层结构,从内至外分别为低折射率芯层、环形芯、内包层和外包层,如图 2(a)所示,图中折射率用 n 表示,半径用 r 表示。环形芯作为传输层,其中不仅掺杂增益介质材料 PbSe,同时还掺杂 GeO_2 来提高环形芯折

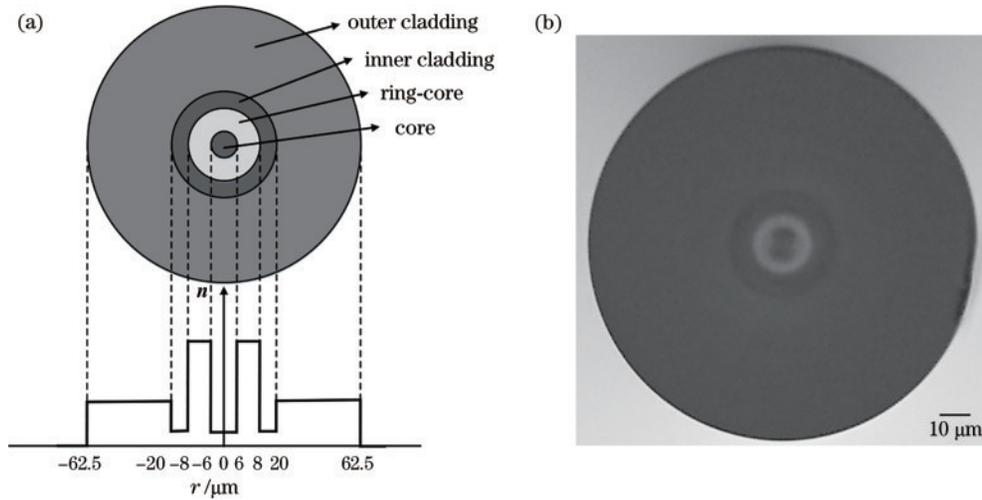


图2 PbSe量子点掺杂环形芯光纤横截面。(a)所设计光纤的横截面;(b)实验制备光纤的横截面

Fig. 2 Cross-section of the PbSe quantum dot-doped ring-core fiber. (a) Cross-section of the designed fiber; (b) cross-section of the prepared fiber

射率。而在低折射率芯层和内包层掺杂硼化物来降低折射率,从而增大了环形芯和内包层的折射率差,实现涡旋模式的稳定传输。

通过光学显微镜观测所制备的掺杂环形芯光纤端面,结果如图2(b)所示。利用光纤折射率分析仪测量得到光纤环形芯和内包层的折射率差为2.2%,外包层的半径为63 μm ,环形芯厚度为8 μm 。

2.2 PbSe量子点掺杂环形芯光纤组分、微观成分表征和荧光特性

使用拉曼光谱仪对实验制得的PbSe量子点掺杂环形芯光纤的拉曼特性进行测试,结果如图3所示。该掺杂环形芯光纤中可以观测到的拉曼峰有448 cm^{-1} 、596 cm^{-1} 、797 cm^{-1} 、927 cm^{-1} 和1058 cm^{-1} 。其中,448 cm^{-1} 、596 cm^{-1} 和797 cm^{-1} 这三个峰位是石英光纤中的标准拉曼峰^[25-26],448 cm^{-1} 处出现的拉曼峰是六元环 SiO_4 中桥氧(Si—O—Si键)的对称拉伸所致,596 cm^{-1} 是三元环 GeO_4 中桥氧的呼吸运动所致,797 cm^{-1} 是由桥氧的横向光学模的弯曲变形引起

的。根据文献[27-28],另外两个拉曼峰927 cm^{-1} 和1058 cm^{-1} 主要来源于PbSe离子氧化产生的 PbSeO_4 。新的拉曼峰表明实验制备光纤时已经成功将PbSe材料掺入光纤中。

利用电子探针显微分析技术,在PbSe量子点掺杂光纤的环形芯区域选取点进行扫描并进行元素分析,结果如表1所示。可知该光纤中存在O、Si、Ge、B、Pb和Se元素,这表明在制备过程中,PbSe材料已成功掺杂到环形芯区域。与光纤制备常用的Si、O、Ge、B元素相比,扫描位置处的Pb和Se元素含量较低,这是由于PbSe材料高温易挥发,沉积在管壁的PbSe含量较低。

表1 PbSe量子点掺杂环形芯光纤中不同元素的质量分数
Table 1 Mass fraction of different elements in the PbSe quantum dot-doped ring-core fiber

Element	Mass fraction / %
O	54.8079
Si	33.8807
Ge	11.1946
B	0
Pb	0.1047
Se	0.0121
Total	100

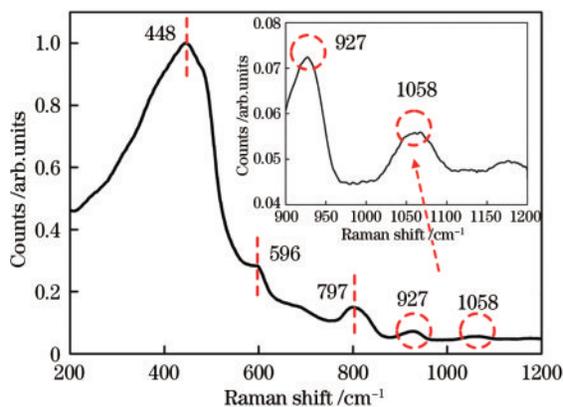


图3 PbSe量子点掺杂环形芯光纤的拉曼光谱

Fig. 3 Raman spectrum of the PbSe quantum dot-doped ring-core fiber

制备环形芯光纤的主要材料是四氯化硅(SiCl_4),其在高温下和氧气发生反应,最终生成二氧化硅(SiO_2), SiO_2 是一种非晶体,而PbSe粉末在光纤制备过程中高温形成PbSe量子点晶体结构。对于纳米晶体掺杂光纤而言,晶体质量直接影响其光学特性,更好的晶体质量有利于发光效率的提升。通过高分辨透射电子显微镜(HRTEM),在原子尺度上对PbSe量子点掺杂环形芯光纤样品中的晶体结构进行成像。从图4(a)的测试图像中能看出,此环形芯光纤中除非晶

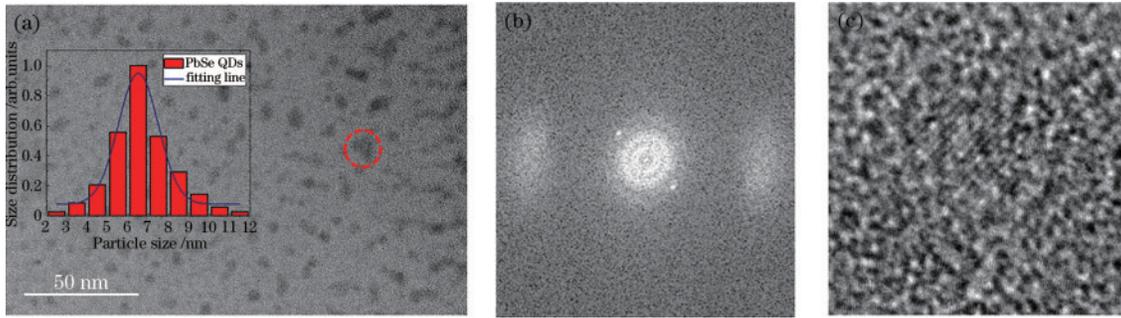


图 4 PbSe 量子点电镜测试图。(a)HRTEM 下的 PbSe 量子点;(b)对应晶格结构的电子衍射图;(c)PbSe 量子点形成的异质结构
Fig. 4 Electron microscopy test of PbSe QDs. (a) HRTEM micrograph of PbSe QDs; (b) SAED micrograph of corresponding lattice structures; (c) heterogeneous structure of the PbSe QDs

体外,还有些许深色的纳米结构点,即成功掺杂的 PbSe 量子点晶格结构。对量子点尺寸进行标记处理,插图中可见这些纳米粒子的尺寸主要分布在 5~8.5 nm,少数分布在 8.5~12 nm 和 2~5 nm。选取其中一个晶格结构(红色圆虚线),其对应选区的电子衍射(SAED)如图 4(b)所示,且对应 PbSe 形成的异质结构如图 4(c)所示。

PbSe 量子点掺杂环形芯光纤的荧光强度随泵浦光功率的变化如图 5 所示。使用 980 nm 激光器作为泵浦源,光功率输出范围为 300~900 mW。从图 5 可以看出,PbSe 量子点掺杂环形芯光纤具有宽带发光特性,荧光覆盖波段范围为 1200~1700 nm。由于在光纤制备过程中 PbSe 材料在高温影响下化学键结构发生变化及重组^[29],析出了不同尺寸的 PbSe 量子点,不同尺寸量子点发射波长不一样^[30],从而在 980 nm 激光的激励下产生了较宽范围的荧光光谱。此外光纤荧光强度随着泵浦光功率的增加而增大,在泵浦光功率升至 800 mW 时,荧光强度不再增加,开始出现饱和现象。这是由于在 PbSe 量子点能级结构中,基态粒子不断吸收泵浦光,跃迁到激发态,但光纤内 PbSe 掺杂浓度是一定的,最终所有基态粒子完成粒子数反转,此后

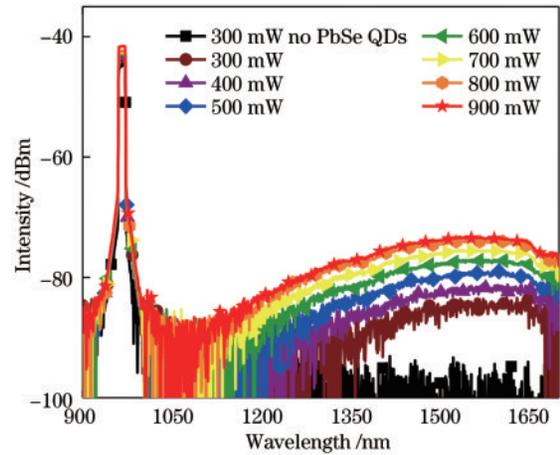


图 5 PbSe 量子点掺杂环形芯光纤荧光光谱
Fig. 5 Fluorescence spectra of PbSe quantum dot-doped ring-core fiber

再增加泵浦光功率,荧光强度也不会增强。

3 涡旋光放大系统搭建

基于 PbSe 量子点掺杂环形芯光纤搭建了涡旋光放大系统,如图 6 所示。1550 nm 激光器(TLX1, THORLABS, 美国)作为信号源,1×2 的耦合器将激

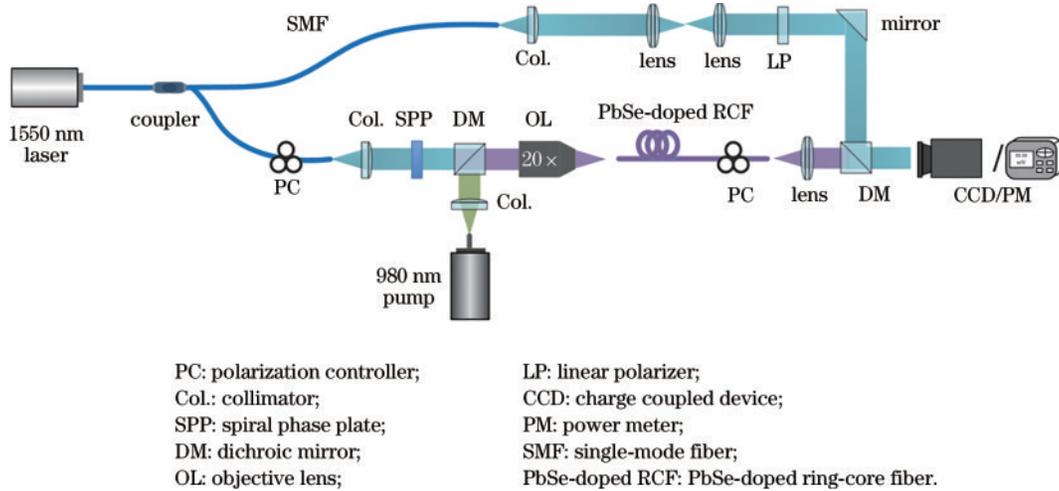


图 6 涡旋光放大系统示意图
Fig. 6 Schematic diagram of vortex beam amplification system

光器输出的高斯光束分为两束,一束作为干涉光路的参考光束,另一束使用螺旋相位板(SPP)将其转换为涡旋光束。所用 SPP 为商用 1~3 阶涡旋波片,高斯光束在通过 SPP 后产生不同的相位延迟,从而生成螺旋形波前的涡旋光束。加入偏振控制器调整光束的偏振方向,二向色镜将波长为 980 nm 的泵浦光(ASPUMPL-976-1600-B-EP,上海傲秀信息技术有限公司,上海)和信号光进行耦合,之后通过物镜聚焦到 PbSe 量子点掺杂环形芯光纤中,经过 20 m 的光纤传输,使用红外相机(C10633, HAMAMATSU, 日本)观测输出端光束的光强分布,使用光功率计收集涡旋光束放大前后的光功率值从而评估涡旋模式的增益特性。整个光路系统采用的透镜、波片和偏振控制器等均采用 THORLABS 的光学器件。

4 涡旋模式增益特性研究

通过对应阶数的螺旋相位板,1550 nm 的信号光在自由空间中可直接生成涡旋光束,在 PbSe 量子点掺杂环形芯光纤的输入端光斑如图 7 所示,其中图 7(a)~(c)分别为 $OAM_{|l|=1}$ 、 $OAM_{|l|=2}$ 和 $OAM_{|l|=3}$ 模式的模场强度分布,可以看到, OAM 模式的场强分布均呈环状分布,并且涡旋光束的光环尺寸随着拓扑荷数值的增大而增大。利用二向色镜,将另一路单模光纤传输的高斯光束直接与螺旋相位板生成的涡旋光束进行叠加耦合,从而观测生成的干涉条纹,图 7(d)~(f)分别为 $OAM_{|l|=1}$ 、 $OAM_{|l|=2}$ 和 $OAM_{|l|=3}$ 模式的螺旋干涉条纹,干涉结果说明各阶螺旋相位板成功生成对应阶数的涡旋光束。

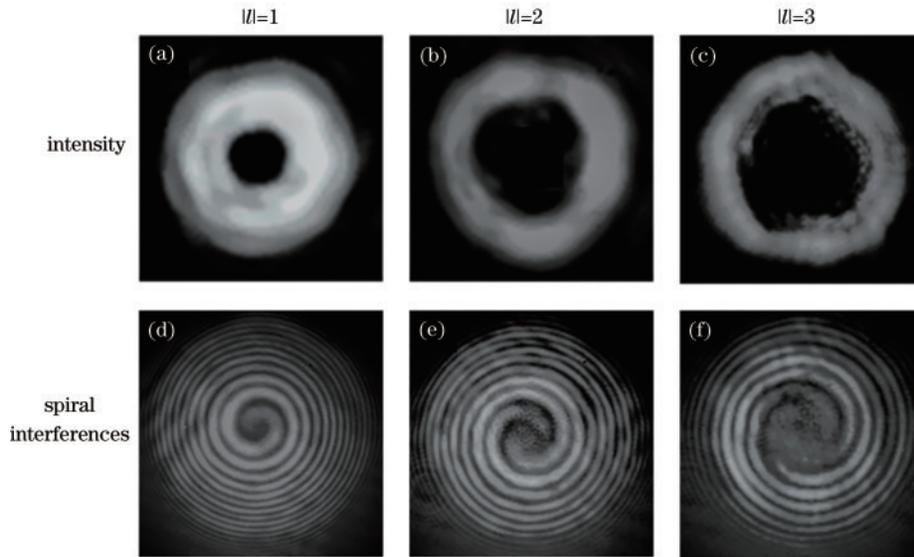


图 7 输入端的 OAM 模式。(a)~(c) 1~3 阶 OAM 模式的场强分布图;(d)~(f) 1~3 阶 OAM 模式的螺旋干涉图

Fig. 7 OAM modes at the input. (a)~(c) Field intensity distributions of $OAM_{|l|=1-3}$ modes; (d)~(f) spiral interference patterns of $OAM_{|l|=1-3}$ modes

在经过长为 20 m 的 PbSe 量子点掺杂环形芯光纤传输后,光纤输出端的光斑如图 8 所示,图 8(a)~(c) 对应于输入模式为 $OAM_{|l|=1}$ 、 $OAM_{|l|=2}$ 和 $OAM_{|l|=3}$ 的输出模式分别为 $OAM_{|l|=1}$ 、 $OAM_{|l|=2}$ 和 $OAM_{|l|=3}$ 模式的输出场强分布图。图 8(d)~(i) 为 1~3 阶 OAM 模式与高斯光束进行干涉,从而产生的对应清晰螺旋干涉条纹。实验结果表明,该 PbSe 量子点掺杂环形芯光纤可以稳定传输 OAM 模式,且本文搭建的测试系统具有良好的耦合效果。

在整个光路系统的末端,利用光功率计记录未加泵浦时环形芯光纤输出端的功率,再打开泵浦源,测量信号光放大后的光功率,通过计算可以得到该光纤 OAM 模式的开关增益。实验中,1550 nm 信号源输出功率为 -45 dBm,光纤输入端的泵浦光功率为 42~634 mW,可以得到 1~3 阶 OAM 模式的开关增益随泵浦光功率的变化如图 9(a) 所示。图中 1~3 阶 OAM 模

式增益随着泵浦光功率的增加而增加,在泵浦光功率为 634 mW 时,所有 OAM 模式的开关增益均大于 13 dB,其中 $OAM_{|l|=1}$ 模式的开关增益最高,为 15.45 dB。各个模式间的 DMG 随着泵浦光功率的变化如图 9(b) 所示,DMG 小于 2.45 dB,且 DMG 随泵浦光功率的增加大致呈上升趋势。

对近年来光纤放大器研究结果进行汇总比较,如表 2 所示。表中数据表明:近几年实验制备的环形芯掺铒涡旋光纤在 C 波段内涡旋光模式的最优增益大于 26.6 dB,最大传输 OAM 阶数为 3;量子点掺杂光纤放大器由于具有可调谐发射光谱的特性,在更宽频带上具有优势。结合两者优点,本文提出的 PbSe 量子点掺杂环形芯光纤可传输 OAM 模式数为 3,且在 C 波段内增益均高于 13 dB,表现出了放大性能。后续研究可以从以下方面进行优化:1) 在制备工艺上,通过将 MCVD 法和原子层沉积技术相结合,提高

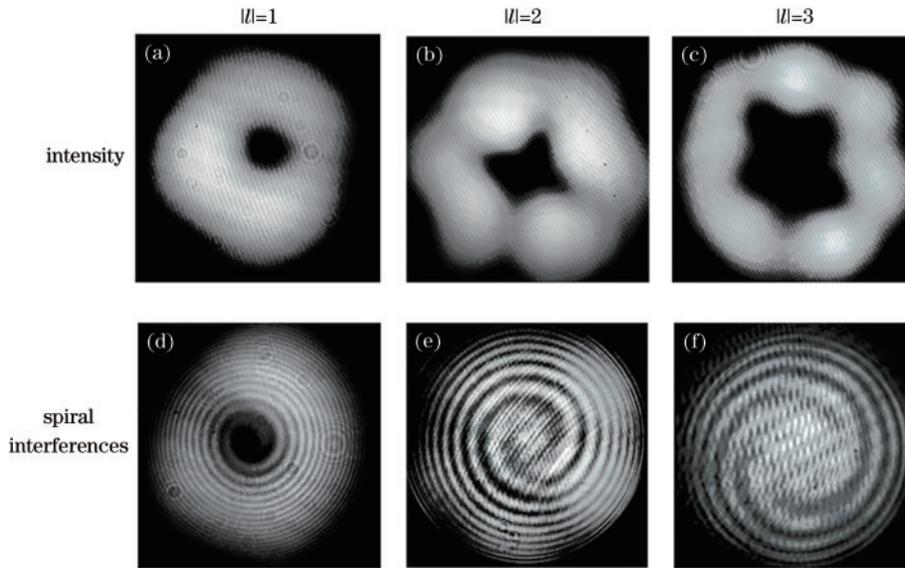


图 8 输出端的 OAM 模式。(a)~(c)1~3 阶 OAM 模式的场强分布图;(d)~(f)1~3 阶 OAM 模式的螺旋干涉图
Fig. 8 OAM modes at the output. (a)-(c) Field intensity distributions of OAM_{|l|=1~3} modes; (d)-(f) spiral interference patterns of OAM_{|l|=1~3} modes

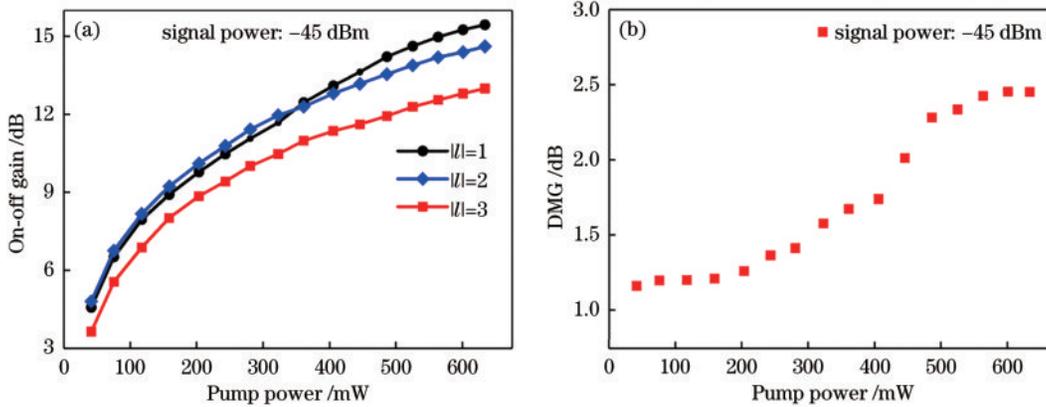


图 9 增益特性。(a)OAM 模式开关增益随泵浦光功率的变化;(b)DMG 随泵浦光功率的变化
Fig. 9 Gain characteristic. (a) OAM mode on-off gain varies with pump power; (b) DMG varies with pump power

表 2 近年来光纤放大器性能与本文的结果对比

Table 2 Comparison of our results with recently published work on fiber amplifier

Gain medium	OAM order	Wavelength / nm	Gain / dB	DMG / dB
Er ^[10]	l =0—3	1540—1560	22.9	1.8
Er ^[11]	l =1—2	1530—1565	26.6	1.6
PbS ^[15]	—	1470—1620	16—19	—
PbS ^[16]	—	1050—1350	15.0	—
PbSe ^[21]	—	1250—1370	12	—
PbSe (proposed)	l =1—3	1530—1565	13	2.45

PbSe 量子点掺杂浓度来增大光纤增益,控制 PbSe 量子点掺杂尺寸的均匀性实现更宽带宽;2)适当增大环形芯与内包层的折射率差以及增加环形芯厚度,实现避免矢量模式简并的同时增加可传输 OAM 模式的数量。

5 结 论

本文设计并利用 MCVD 法成功制备了 PbSe 量子点掺杂环形芯光纤,光纤为双包层结构,其环形芯与内包层的折射率差达到 2.2%,通过拉曼光谱、电子探针显微分析技术和电镜下晶格测试,证明了 PbSe 量子点成功掺入光纤中。基于该光纤搭建了涡旋光放大系统,实现了 1~3 阶的 OAM 模式的增益特性研究,在泵浦光功率为 634 mW,1550 nm 处的 OAM 模式开关增益均大于 13 dB,模式间的 DMG 小于 2.45 dB。此外,可以通过增大环形芯与内包层的折射率差,以及适当增加环形芯厚度来增加模场直径,即与大模场直径单模光纤结合,来减小传输损耗,实现避免矢量模式简并的同时增加可传输 OAM 模式的数量。也可以通过优化光纤制备工艺,例如将原子层沉积技术与 MCVD 技术结合,增加 PbSe 材料掺杂量来提高光纤增益。原子层沉积技术流程是一个顺次过程,即每个周期生长的

薄膜都是一个单原子层,因而可以精确控制沉积厚度。其制备的光纤薄膜具有均匀性良好、厚度控制精确、保形性完整等优点。因此对于 PbSe 量子点掺杂数密度的提高和尺寸均匀性的控制,后续工作也有待重点研究。而且 PbSe 量子点在红外区域具有较强的发射谱、吸收和发射峰位可调、量子产率较高和激发阈值较低的优势,这些特性为基于 PbSe 量子点掺杂环形芯光纤的涡旋光放大系统在未来实现超宽带 OAM 模式的放大提供了可行性。

参 考 文 献

- [1] Willner A E, Huang H, Yan Y, et al. Optical communications using orbital angular momentum beams [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2015, 7(1): 66-106.
- [2] Pang F F, Xiang L N, Liu H H, et al. Review on fiber-optic vortices and their sensing applications[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(12): 3740-3750.
- [3] Cheng W C, Zhang W, Jing H Y, et al. Orbital angular momentum for wireless communications[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2019, 26(1): 100-107.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Zhu G X, Hu Z Y, Wu X, et al. Scalable mode division multiplexed transmission over a 10-km ring-core fiber using high-order orbital angular momentum modes[J]. *Optics Express*, 2018, 26(2): 594-604.
- [7] Gregg P, Kristensen P, Ramachandran S. 13.4 km OAM state propagation by recirculating fiber loop[J]. *Optics Express*, 2016, 24(17): 18938-18947.
- [8] Brunet C, Vaity P, Messaddeq Y, et al. Design, fabrication and validation of an OAM fiber supporting 36 states[J]. *Optics Express*, 2014, 22(21): 26117-26127.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 刘帅帅, 张亮, 魏鹤鸣, 等. 环形芯掺铒涡旋光纤的放大特性研究[J]. *中国激光*, 2023, 50(10): 1006003.
Liu S S, Zhang L, Wei H M, et al. Study on amplification of ring-core erbium-doped vortex fibers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(10): 1006003.
- [12] 赵新月, 邱强, 娄阳, 等. 高增益、低 DMG 少模掺铒光纤及其放大性能研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(9): 0906006.
Zhao X Y, Qiu Q, Lou Y, et al. Study on few-mode erbium-doped fiber with high gain, low DMG and its amplification performance[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(9): 0906006.
- [13] Dantas N O, Qu F Y, Monte A F G, et al. Optical properties of IV-VI quantum dots embedded in glass: size-effects[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2006, 352(32/33/34/35): 3525-3529.
- [14] Pietryga J M, Werder D J, Williams D J, et al. Utilizing the lability of lead selenide to produce heterostructured nanocrystals with bright, stable infrared emission[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2008, 130(14): 4879-4885.
- [15] 程成, 吴昌斌. 近红外 S-C-L 超宽带低噪声 PbS 量子点掺杂光纤放大器[J]. *光学学报*, 2018, 38(10): 1006006.
Cheng C, Wu C B. PbS quantum-dot-doped fiber amplifier in NIR S-C-L ultra-broad waveband with low noise[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(10): 1006006.
- [16] Zheng J J, Dong Y H, Pan X P, et al. Ultra-wideband and flat-gain optical properties of the PbS quantum dots-doped silica fiber[J]. *Optics Express*, 2019, 27(26): 37900-37909.
- [17] Cheng C, Jiang H L, Ma D W, et al. An optical fiber glass containing PbSe quantum dots[J]. *Optics Communications*, 2011, 284(19): 4491-4495.
- [18] 许周速, 冯文举, 刘小峰, 等. 近红外 IV-VI 族半导体量子点掺杂玻璃及光纤研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(15): 1516018.
Xu Z S, Feng W J, Liu X F, et al. Near infrared IV-VI semiconductor quantum dot-doped glasses and fibers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(15): 1516018.
- [19] Watekar P R, Ju S, Lin A X, et al. Linear and nonlinear optical properties of the PbSe quantum dots doped germano-silica glass optical fiber[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2010, 356(44/45/46/47/48/49): 2384-2388.
- [20] 许周速, 程成, 马德伟. 较高浓度 PbSe 量子点硅酸盐玻璃的制备及光学表征[J]. *光学学报*, 2012, 32(9): 0916002.
Xu Z S, Cheng C, Ma D W. Preparation and optical characterization of PbSe quantum dot-doped silicate glass with high concentration[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(9): 0916002.
- [21] Cheng C, Hu N S, Cheng X Y. Experimental realization of a PbSe quantum dot doped fiber amplifier with ultra-bandwidth characteristic[J]. *Optics Communications*, 2017, 382: 470-476.
- [22] Zhang L, Huang T H, Ning L N, et al. Effects of doped material properties on the emission of quantum dot optical fiber[J]. *Optical Fiber Technology*, 2020, 58: 102305.
- [23] 王伟, 古权, 陈钦鹏, 等. 中红外宽带荧光 PbSe 量子点掺杂玻璃光纤研究[J]. *中国激光*, 2022, 49(1): 0101013.
Wang W, Gu Q, Chen Q P, et al. Investigation of PbSe quantum dot-doped glass fibers with broadband mid-infrared emission[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(1): 0101013.
- [24] Yang J H, Xu L M, Shang Y N, et al. A PbS-doped

- optical fiber amplifier based on MCVD[C]//Asia Communications and Photonics Conference, November 2-5, 2019, Chengdu, China. Washington, D.C.: Optica Publishing Group, 2019: S3G. 1.
- [25] Henderson G S, Bancroft G M, Fleet M E, et al. Raman spectra of gallium and germanium substituted silicate glasses: variations in intermediate range order[J]. *American Mineralogist*, 1985, 70(9/10): 946-960.
- [26] Henderson G S, Neuville D R, Cochain B, et al. The structure of GeO₂-SiO₂ glasses and melts: a Raman spectroscopy study[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2009, 355(8): 468-474.
- [27] Pawłowski A, Połomska M, Hilczer B, et al. Superionic phase transition in Rb₃D(SeO₄)₂ single crystals [J]. *Journal of Power Sources*, 2007, 173(2): 781-787.
- [28] Blackburn J L, Chappell H, Luther J M, et al. Correlation between photooxidation and the appearance of Raman scattering bands in lead chalcogenide quantum dots[J]. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 2011, 2(6): 599-603.
- [29] Liu C, Heo J. Lead chalcogenide quantum dot-doped glasses for photonic devices[J]. *International Journal of Applied Glass Science*, 2013, 4(3): 163-173.
- [30] Skurlov I, Sokolova A, Galle T, et al. Temperature-dependent photoluminescent properties of PbSe nanoplatelets[J]. *Nanomaterials*, 2020, 10(12): 2570.