

基于 PbS 掺杂环形芯光纤的光放大器

徐灵敏, 商娅娜*, 陈振宜

(上海大学 特种光纤与光接入网重点实验室, 上海 200444)

摘要: 为了解决光纤传输的信号衰减和容量限制的问题, 利用改进的化学气相沉积(MCVD)法制备了硫化铅(PbS)掺杂环形芯光纤, 并且搭建反向泵浦光放大实验装置实现了在 C 波段的宽带放大, 为后续利用 PbS 掺杂光纤实现少模光纤放大器提供了可能性。实验结果表明: 随着泵浦功率的增加, 样品光纤在 C 波段的开关增益增大; 而随着信号功率的增大, 开关增益减小; 当泵浦功率为 750 mW、信号光功率为 0.003 nW 时, 样品光纤在 C 波段的开关增益为 8 dB 左右。

关键词: 光纤放大器; 硫化铅掺杂; 环形芯光纤; 开关增益

中图分类号: TN256 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2020)11-0035-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.11.008

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Optical amplifier based on PbS doped ring core fiber

XU Lingmin, SHANG Ya'na*, CHEN Zhenyi

(Key laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: In order to solve the problems of signal attenuation and capacity limitation in optical fiber transmission, PbS doped ring core fiber is prepared by improved chemical vapor deposition (MCVD), and a reverse pump light amplification experimental device is built to realize broadband amplification in C band, which provides the possibility for the realization of less mode fiber amplifier by using PbS doped fiber. The experimental results show that the switching gain of sample fiber in C-band increases with the increase of pump power, the switching gain decreases with the increase of signal power. When the pump power is 750 mW and the signal power is 0.003 nW, the switching gain of the sample fiber in C-band is about 8 dB.

Key words: optical fiber amplifier; PbS doped; ring core fiber; on-off gain

0 引言

在光通信系统的传输过程中, 信号的衰减不可避免, 为了保证输出信号的质量, 需要在信号传输过程中对其进行放大。掺杂光纤在制备光纤放大器、光纤激光器等光学器件方面有着重要作用, 在光纤通信领域具有非常重要的应用价值, 而稀土元素作为光增益介质时, 性能非常优异, 因此它被广泛应用于掺杂光纤放大器。然而, 稀土资源的稀缺性, 导致稀土元素掺杂光纤放大器的成本较高。如果将硫化铅(PbS)半导体

材料作为光增益介质来代替稀土元素制备掺杂光纤, 可以大大降低掺杂光纤放大器的制造成本。PbS 材料作为量子点结构存在时具有很多优异的性质, 如较小的能带带隙、较大的激子玻尔半径和较宽的荧光光谱带宽。各种研究表明: 通过控制 PbS 量子点的尺寸, 在 800~1800 nm 可调宽带范围内可以实现发光^[1-3]。2017 年, 华南理工大学黄雄建等人^[3]利用“管内熔融”法成功制备了 PbS 量子点掺杂玻璃光纤, 当泵浦光波长为 808 nm 时, 该样品光纤能在 1000~1700 nm 可调谐宽带内发光, 但是该方法制备出的样品光纤损耗较高。2018 年, 浙江工业大学的程成等人^[4]将紫外固化胶作为光纤纤芯本底制备了 PbS 量子点光纤放大器, 在 1470~1620 nm 范围实现了光信号放大, 开关增益达到 16~19 dB。2019 年, 上海大学郑佳佳等人^[5]将原子层沉积(ALD)技术和改进的化学气相沉积(MCVD)技术相结合, 成功制备出了 PbS 量子点掺杂光纤, 该样品光纤的荧光光谱范围为 1050~1350 nm, 实验得到光纤的开

收稿日期: 2020-04-24。

基金项目: 国家自然科学基金(61675125、61875118)资助。

作者简介: 徐灵敏(1995—), 女, 硕士生, 现就读于上海大学通信与信息工程学院, 在特种光纤与光接入网重点实验室主要参与与特种光纤、光纤放大器相关的工作, 尤其是半导体量子点掺杂宽带有源光放大器 and 一阶隅光放大器方面。

* 通信作者: 商娅娜(E-mail: ynshang@shu.edu.cn)。



徐灵敏,商娅娜,陈振宜;基于 PbS 掺杂环形芯光纤的光放大器

关增益和净增益范围分别为 7.1~15.0 dB 和 6.0~9.2 dB。但是,上述 2 种方法制备的 PbS 量子点掺杂光纤在制作方法和步骤上比常规光纤繁琐。同年,上海大学陈惠等人^[6]利用 MCVD 法直接制备了 PbS 掺杂石英光纤,并研究了 PbS 掺杂石英光纤的喇曼增强特性,其制备方法简单易操作,但该实验的 PbS 掺杂石英光纤的增益较小。

近年来,少模光纤放大器成为了模式复用领域的研究热点^[10~12]。2014 年,南安普顿大学的 Yongmin Jung 等人^[11]通过搭建少模掺铒光纤放大器(EDFA),实现了四模信号的放大,模式 LP_{01} 、 LP_{11} 、 LP_{21} 和 LP_{02} 在 C 波段的小信号增益大于 20 dB,差模增益(DMG)为 3 dB。2015 年,NTT 实验室的 Hirotaka Ono 等人^[12]在相同条件下比较了环形芯掺铒光纤与传统阶跃掺铒光纤的模式增益。实验结果表明:环形芯 EDFA 的 DMG 小于阶跃 EDFA,证明了环形芯光纤结构可以改善放大器的 DMG。但是,上述 2 组实验均只研究了掺铒光纤的少模放大,而掺铒光纤的放大带宽较窄。2019 年,康亚男等人^[13]仿真研究了基于 PbS 量子点掺杂环形芯光纤的少模光纤放大器,实现了 C+L 波段的 LP 模式放大,该研究在理论上研究了 PbS 量子点掺杂光纤实现少模放大的可能性,但并未进行实验验证。

为了解决光纤传输的信号衰减和容量限制的问题,本文将 PbS 材料与环形芯光纤结构相结合,利用 MCVD 法直接将 PbS 半导体材料作为掺杂材料制备 PbS 掺杂环形芯少模光纤,并研究该掺杂光纤放大器的放大特性。

1 PbS 掺杂环形芯少模光纤的制备及传输模式仿真

本文利用 MCVD 法制备了 PbS 掺杂环形芯少模光纤,其流程如下:首先,利用氢氧焰加热纯石英玻璃基管,打开石墨炉加热 PbS 粉末直至汽化,通入氧气将制备所需的各种化学试剂气体载入已被加热至 1700~1900 °C 高温的纯石英玻璃基管中;然后,在氢氧焰的加热下对预制棒进行玻璃化处理,将其塌缩成为 PbS 掺杂光纤预制棒;最后,再由拉丝塔拉伸得到样品光纤。

PbS 掺杂环形芯光纤端面,如图 1 所示。通过光学显微镜观察光纤的包层直径为 129.81 μm ,空气孔直径为 10.83 μm ,环形芯的外环直径为 21.52 μm 。将环形芯内部的空气孔填充匹配液后,再利用上海大学研制的光纤三维折射率测试仪(SHR-1602)测得该样品

光纤的折射率分布如图 2 所示,包层折射率为 1.457,环形芯的折射率为 1.467。

图 2 中灰色部分为填充了匹配油的空气孔。由上述实验可知:该样品光纤环形芯厚度约为 5.35 μm ,光纤的包层和环形芯的折射率差为 1%左右,该样品光纤的环形明显且较为完整。

本文采用截断法测量 PbS 掺杂环形芯光纤的损耗。首先,用白光光源和光谱仪测量长度为 60 m 左右的样品光纤的传输谱,再从样品光纤的一端截取长度为 0.6 m 的光纤测量其传输谱,如图 3 所示。可以看出,该样品光纤在 950~1500 nm 和 400~600 nm 处的损耗较大。将所得的 2 个传输谱相减可得到样品光纤的吸收谱,样品光纤在 1500~1570 nm 处的吸收谱如

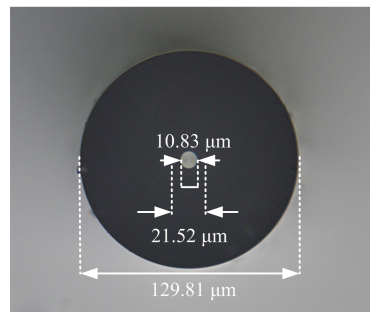


图 1 光纤端面图

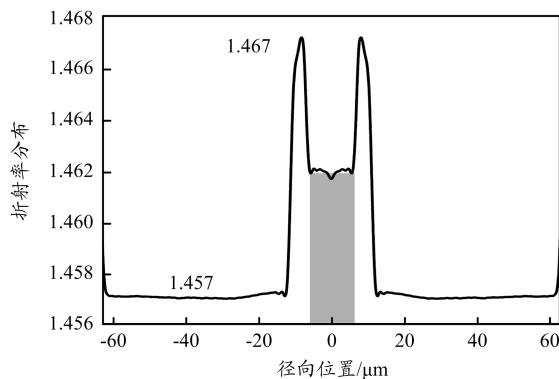


图 2 光纤折射率分布

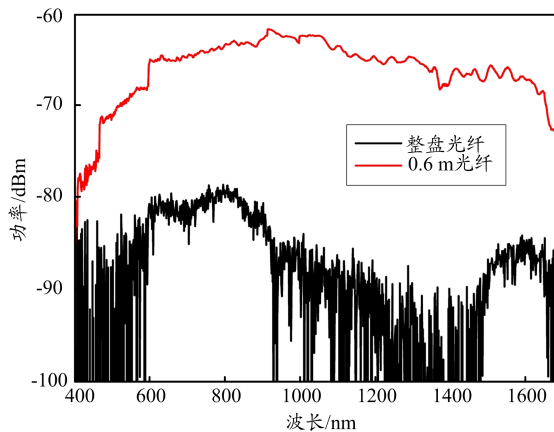


图 3 光纤传输谱

图 4 所示,可以看出,样品光纤在 1500~1570 nm 处的损耗大约为 18.2~21.2 dB,平均损耗约为 0.30~0.35 dB/m。

由上述实验结果可得 PbS 掺杂环形芯光纤的实际参数,包括折射率、内环直径、

外环直径和光纤包层直径。采用该样品光纤实际参数的数据作为仿真的参数,利用 COMSOL 多物理场仿真软件的射频模块分析该样品光纤支持传输的矢量模式。本文在仿真过程中不考虑高阶径向模式,只考虑模式强度分布图中的径向阶数为 1 的情况(这是由于高阶径向模式在某些波长范围内发生简并后容易造成交叉耦合,且尚未实现与无源光纤的耦合),结果如图 5 所示。当信号光波长为 1550 nm 时,该光纤可以支持传输 10 种矢量模式包括 HE_{11} 、 TM_{01} 、 HE_{21} 、 TE_{01} 、 HE_{31} 、 EH_{11} 、 EH_{21} 、 HE_{41} 、 EH_{31} 和 HE_{51} , 从图中可以看出这些矢量模式被很好地限制在光纤的环形芯中。

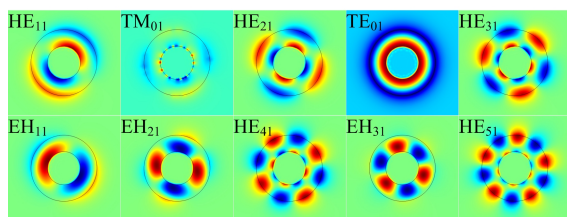


图 5 光纤支持传输的矢量模式

2 PbS 掺杂环形芯光纤放大器的放大特性研究

实验搭建的反向泵浦光纤放大实验装置系统如图 6 所示。由于目前的光通信系统使用 C 波段较多,且该波段通信技术研究较为成熟,所以本文选择中心波长为 1550 nm 的宽带光源作为信号光,980 nm 的激光源作为光放大器的泵浦光。通过 2 种光放大实验研究 C 波段处样品光纤的开关增益随泵浦功率和信号

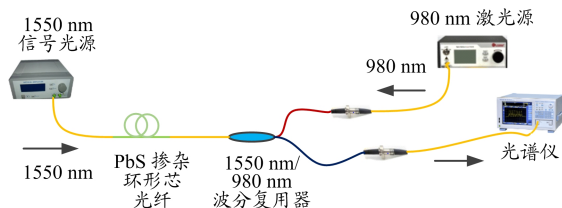


图 6 光纤放大器实验装置示意图

功率的变化情况,验证不同参数对光纤增益的影响。

实验一:保持信号光功率为 -80 dBm 不变,同时增大泵浦光功率,将它从 0 mW 增大到 500 mW,可测得 PbS 掺杂环形芯光纤的输出光谱如图 7 所示。可以看出,该样品光纤在 1500~1600 nm 处有明显增益,带宽为 100 nm 左右。由图 7 得到样品光纤在 C 波段的开关增益随泵浦功率变化如图 8 所示。当其它条件不变时,随着泵浦光功率的增大,样品光纤在 C 波段处的开关增益也在不断增大;当泵浦光功率为 500 mW 时,样品光纤在 C 波段的开关增益为 4.24~7.71 dB,其中样品光纤在 1530 nm 处的开关增益最大,可以达到 7.71 dB。

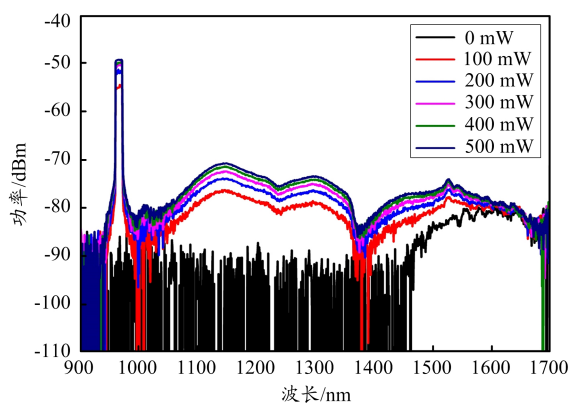


图 7 不同泵浦功率下信号光输出谱

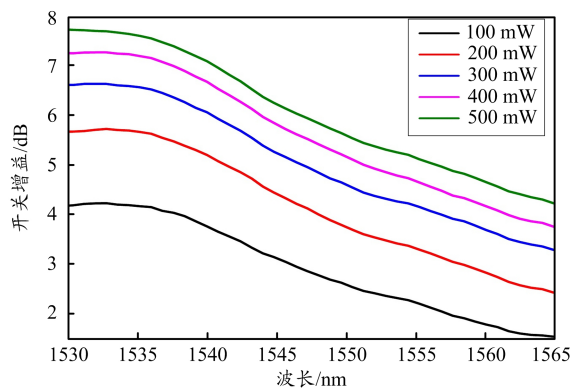


图 8 不同泵浦功率下光纤增益谱

实验二:调节泵浦光功率为 750 mW 不变,改变 C 波段的信号光功率,研究样品光纤在 C 波段的开关增益变化。将 C 波段的信号光功率从 0.118 nW 一直减小到 0.003 nW,其光输出谱如图 9 所示,同时得到不同信号光功率下样品光纤的开关增益谱如图 10 所示。由图 9 和图 10 可知,当泵浦光功率为 750 mW 不变时,随着信号光功率的减小,样品光纤在 C 波段的开关增益不断增大;当信号光功率为 0.003 nW 时,开关增益最大可以达到 8 dB 左右。该样品光纤的开关增

徐灵敏, 商娅娜, 陈振宜: 基于 PbS 掺杂环形芯光纤的光放大器

益不高主要是由光纤掺杂浓度较低、PbS 含量较少导致的。

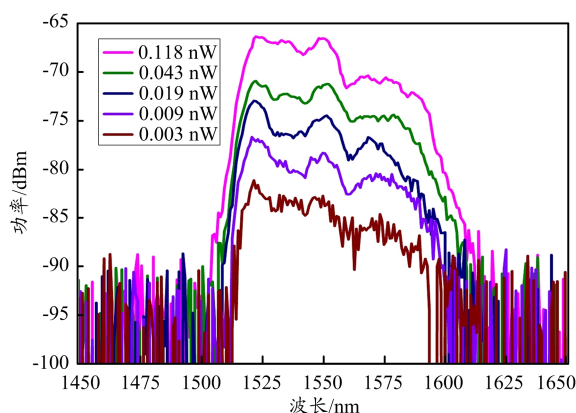


图 9 不同信号光输出谱

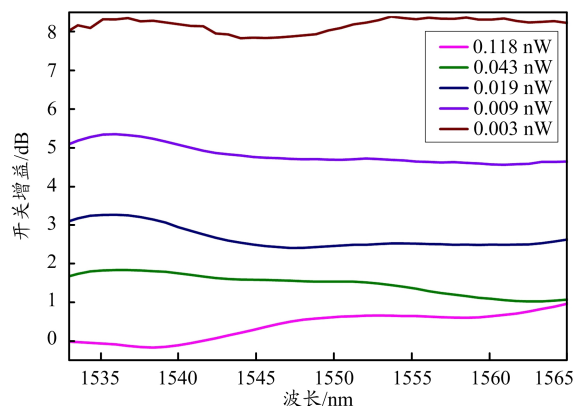


图 10 不同信号光功率下光纤增益

3 结束语

本文利用 MCVD 法制备了 PbS 掺杂环形芯光纤。同时, 将样品光纤的实际参数作为依据进行仿真, 该样品光纤能够支持传输 10 种矢量模式: HE_{11} 、 TM_{01} 、 HE_{21} 、 TE_{01} 、 HE_{31} 、 EH_{11} 、 EH_{21} 、 HE_{41} 、 EH_{31} 和 HE_{51} 。实验搭建了反向泵浦光放大测试系统, 选用中心波长为 1550 nm 宽带光源作为信号光, 研究了该掺杂光纤的宽带放大特性。当信号光功率保持不变时, 增大泵浦光功率, 该样品光纤开关增益变大; 当泵浦光功率保持不变时, 增大信号光功率, 该样品光纤开关增益减小。当泵浦光功率为 750 mW、信号光功率为 0.003 nW 时, 该样品光纤在 C 波段的开关增益为 8 dB 左右。由实验和仿真结果可知: 该样品光纤实现了在 C 波段的宽带放大, 后续有望实现少模宽带放大, 具有很好的应用前景。

然而, 由于光纤中 PbS 掺杂浓度较低, 含量不高, 导致光纤的开关增益较小, 因此还需要改进 PbS 掺杂

工艺, 通过提高载气的纯度和掺杂材料的纯度进一步降低损耗。同时, 后续我们会尝试在不同的温度下对样品光纤进行退火处理, 研究退火对 PbS 掺杂光纤性能的影响及增益变化。通过以上方法制备出损耗较小的 PbS 掺杂光纤, 使之能够应用于未来光通信系统中, 为 PbS 掺杂环形芯光纤应用于少模光纤宽带放大器和少模光纤传输系统提供更多的可能性。

参考文献:

- [1] KERSHAW S V, HARRISON M T, BURT M G. Putting nanocrystals to work: from solutions to devices[J]. Philosophical Transactions of the Royal (Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences), 2003, 361 (1803): 331–343.
- [2] SARGENT E. Infrared quantum dots [J]. Advanced Materials, 2005, 17 (5): 515–522.
- [3] HUANG X, FANG Z, KANG S, et al. Controllable fabrication of novel all solid-state PbS quantum dot-doped glass fibers with tunable broadband near-infrared emission [J]. Journal of Materials Chemistry C, 2017, 5(31): 7927–7934.
- [4] 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): 101–110.
- [5] ZHENG J, DONG Y, PAN X, 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.
- [6] 陈振宜, 陈惠, 商娅娜, 等. 硫化铅掺杂石英玻璃光纤喇曼增强特性研究[J]. 光通信技术, 2020, 44(2): 47–51.
- [7] LABROILLE G, DENOLLE B, JIAN P, et al. Efficient and mode selective spatial mode multiplexer based on multi-plane light conversion[J]. Optics Express, 2014, 22(13): 15599–15607.
- [8] LI J, CAI C, DU J, et al. Ultra-low-noise mode-division multiplexed WDM transmission over 100-km FMF based on a second-order few-mode raman amplifier [J]. Journal of Lightwave Technology, 2018 (99): 3254–3260.
- [9] DONG B, PENG Y, WANG Y, et al. Mode division multiplexing in a fiber modal interferometer for dual-parameters measurement [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(2): 143–146.
- [10] WADA M, SAKAMOTO T, AOZASA S, et al. Differential modal gain reduction of L-band 5-mode EDFA using EDF with center depressed core index[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(4): 762–767.
- [11] JUNG Y, LIM E L, KANG Q, et al. Cladding pumped few-mode EDFA for mode division multiplexed transmission [J]. Optics Express, 2014, 22(23): 29008–29013.
- [12] ONO H, HOSOKAWA T, ICHII K, et al. Improvement of differential modal gain in few-mode fibre amplifier by employing ring-core erbium-doped fibre[J]. Electronics Letters, 2015, 51(2): 172–173.
- [13] YANA SHANG, YANAN KANG, LINGMIN XU, et al. Few-mode ring-core quantum dots-doped optical fiber amplifier [J]. Optical Fiber Technology, 2019(5): 59–63.