

硫化铅掺杂石英玻璃光纤喇曼增强特性研究

陈振宜,陈惠,商娅娜,陈娜*,刘书朋

(上海大学 上海先进通信与数据科学研究院,上海 200444)

摘要:普通单模光纤的喇曼增益低,严重制约了喇曼放大器的发展。因此,研究高喇曼增益的光纤具有重要意义。研究了硫化铅掺杂石英玻璃光纤的喇曼散射增强特性。采用改进的化学气相沉积(MCVD)法分别制备出硫化铅掺杂石英玻璃光纤和普通单模光纤样品,并测得其传输损耗谱和喇曼光谱,实验结果表明:硫化铅掺杂石英玻璃光纤具有更强的喇曼散射强度。在不同的泵浦功率条件下,分别进行了喇曼放大实验,相比于普通单模光纤,硫化铅掺杂石英玻璃光纤具有更大的喇曼增益。

关键词:石英玻璃光纤;硫化铅掺杂;喇曼散射;喇曼增强;喇曼增益

中图分类号:TN256 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-5561(2020)02-0047-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.02.011

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Study of Raman enhancement characteristics of PbS-doped silica fiber

CHEN Zhenyi, CHEN Hui, SHANG Ya'na, CHEN Na*, LIU Shupeng

(Shanghai Institute for Advanced Communication and Data Science, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: The low Raman gain of ordinary single mode fiber severely restricts the development of the Raman amplifier. Therefore, the development of high Raman gain fiber had important significance. This paper studied the Raman scattering enhancement properties of PbS-doped silica fiber. PbS-doped silica fiber and ordinary single mode fiber samples were prepared by modified chemical vapor deposition (MCVD) and their transmission loss spectra and Raman spectra were measured. The experimental results showed that the PbS-doped silica fiber had stronger Raman scattering intensity. Under different pump power conditions, Raman amplification experiments were carried out. Compared with the ordinary single mode fiber, the PbS-doped silica fiber had larger Raman gain.

Key words: silica fiber; PbS-doped; Raman scattering; Raman enhancement; Raman gain

0 引言

近年来,随着大数据中心和云计算的兴起,使得网络带宽的需求量爆发式增长,而流量数据的快速增长给传统的通信网络带来了巨大的挑战。光纤喇曼放大器(FRA)的研究为解决网络数据流剧增提供了解决

收稿日期:2019-04-16。

基金项目:国家自然科学基金项目(61475095,61675125,61575120,61875118)资助;上海大学特种光纤与光接入网重点实验室开放项目(SKLSFO2017-02, SKLSFO2018-5)资助。

作者简介:陈振宜(1959-),男,研究员,博士,博士生导师,现工作于上海大学通信与信息工程学院光纤研究所,主要从事特种光纤预制棒的设计、制备及拉丝,掺杂光纤的制备与特性研究、特种光纤器件与传感研究。曾主持承担并完成国家自然科学基金仪器专项和面上项目多项。

*通信作者:陈娜(Email: na.chen@shu.edu.cn)。



办法。相比于掺铒光纤放大器和半导体光放大器,FRA的优势非常明显:如噪声更低、增益带宽更宽;更重要的是其增益响应仅仅依赖于泵浦源波长,理论上可以实现任意波长信号的喇曼放大^[1]。

目前,已有研究团队制备了各种材料的光纤^[2-10],如亚碲酸盐玻璃光纤^[3]、液芯光纤^[4]和氟磷酸盐玻璃光纤^[6]等。研究表明:亚碲酸盐玻璃光纤放大器具有更高的喇曼增益系数、更宽的增益谱以及更小的增益平坦度等优点^[3]。但是,多组分玻璃光纤传输损耗极大,不适用于长距离传输。液芯光纤的波长传输范围取决于制备材料的选择,该光纤传输波长范围大,并具有可挠曲性良好、生产效率高和生产成本低的优点^[5]。然而,液芯光纤不能过长和过细,工作温度须在-5℃~35℃范围内,且其寿命一般为1~2年^[7]。

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

与上述光纤相比,石英玻璃光纤具有损耗低、寿命长和与现有的光通信网络相兼容等特点。Yang Pengxiang 等人报道了采用改进的气相化学沉积(MCVD)工艺制备的掺 Nb_2O_5 石英玻璃光纤,研究发现,相比于普通单模光纤, Nb_2O_5 掺杂光纤有更大的喇曼增益系数^[8,9]。郝平等研究发现,采用 MCVD 工艺制备了铌酸锂掺杂石英玻璃光纤,与普通单模光纤比较,其喇曼增强特性更强,进一步证明掺杂石英玻璃光纤可以广泛商用^[10]。

为了改进 FRA 的性能,提高喇曼增益,本文对掺杂具有高喇曼增益的特种光纤进行研究。

1 实验装置

1.1 喇曼光谱实验测试系统

本文使用的共聚焦显微喇曼光谱实验测试系统结构图如图 1 所示,分别对硫化铅粉末、硫化铅掺杂石英玻璃光纤以及单模光纤进行了喇曼光谱分析。首先,激光通过二向色镜和反射镜,经物镜聚焦进入被测光纤样品。然后,被测光纤样品的喇曼散射光再经物镜收集,并通过反射镜、二向色镜、滤光片及透镜后进入喇曼光谱分析仪。最后,经计算机系统分析出光纤喇曼光谱。喇曼光谱反映样品的分子振动模式,与泵浦光的波长无关。

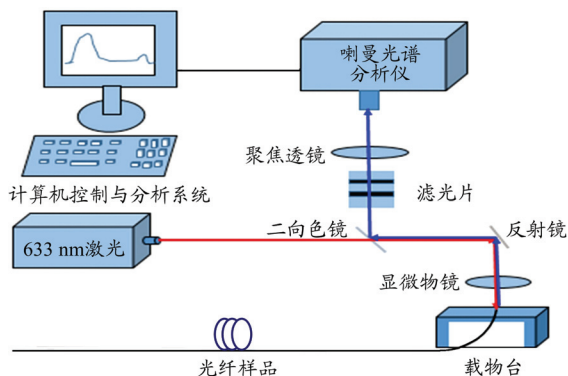


图 1 共聚焦显微喇曼光谱实验测试系统

1.2 光纤喇曼放大实验装置系统

为了研究硫化铅掺杂石英玻璃光纤和普通单模光纤在光纤喇曼放大实验装置系统中对信号光增益的影响,本文搭建了光纤喇曼放大实验装置系统,如图 2 所示。接入隔离器是防止泵浦光进入信号光源,泵浦光通过波分复用器以背向方式注入光纤样品,高的泵浦光功率使传输光纤产生喇曼增益,使光纤中传输的光信号得到放大^[11]。

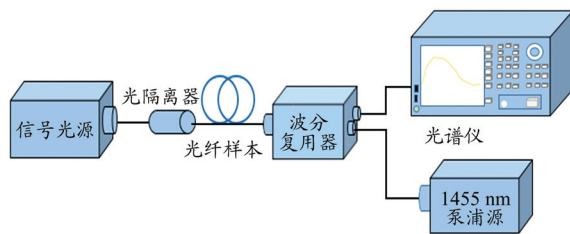


图 2 光纤喇曼放大实验装置系统

实验中分别选取长度为 239 m 的硫化铅掺杂石英玻璃光纤和普通单模光纤作为实验的光纤样品。实验结果表明:在相同实验条件下,信号光放大效果随光纤样品的喇曼增益增大而增强。

2 实验步骤与结果讨论

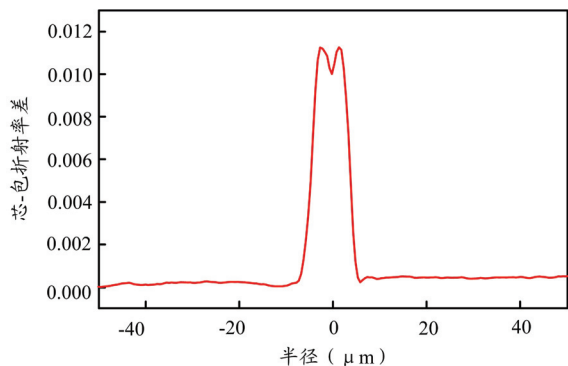
硫化铅掺杂石英玻璃光纤 MCVD 制备工艺流程为:首先,将高纯石英基管置于光纤预制棒熔炼车床的两端可同步旋转的夹持装置上,用氢氧焰喷灯在基管下方进行高温加热;然后,高纯氧气携带四氯化硅和四氯化锗进入石英基管,同时,硫化铅材料经高温气化后也由高纯氧气带入石英基管,经高温氧化反应,在石英基管内壁沉积上掺有二氧化锗和硫化铅的二氧化硅疏松层,再经高温玻璃化处理收缩成光纤预制棒;最后,由小型特种光纤拉丝机拉制出光纤样品。此外,采用同样的工艺过程,制备出了用于比对分析的普通单模光纤样品。

用光纤折射率分析仪(PK-S14)测量折射率分布,硫化铅掺杂石英玻璃光纤和普通单模光纤的芯-包层折射率差分布分别如图 3(a)和图 3(b)所示。可以看出,硫化铅掺杂石英玻璃光纤的芯-包折射率差大于普通单模光纤。

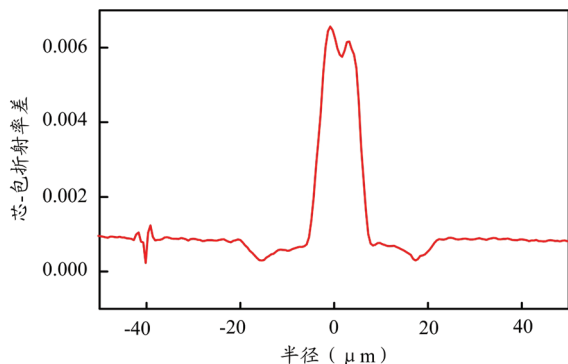
本文采用截断法,分别测量出长度均约为 239 m 的硫化铅掺杂石英玻璃光纤样品和普通单模光纤样品的传输损耗谱,结果如图 4 所示。可以看出,在 1550 nm 处 2 种光纤的传输损耗分别为 2.97 dB 和 2.93 dB。

本文采用图 1 的测量系统测量了硫化铅粉末在 20 ℃下的喇曼光谱,以研究硫化铅对光纤喇曼光谱的影响,其测量参数如下:激发光为 633 nm 波长激光,功率为 6.685 mW,曝光时间为 20 s,波数扫描范围为 50~1000 cm^{-1} 。实验得到的硫化铅粉末喇曼光谱如图 5 所示(图中标出了喇曼峰位值)。

由图 5 可观察到硫化铅粉末有 6 个喇曼峰位,分别处于约 77 cm^{-1} 、132 cm^{-1} 、301 cm^{-1} 、431 cm^{-1} 、602 cm^{-1}

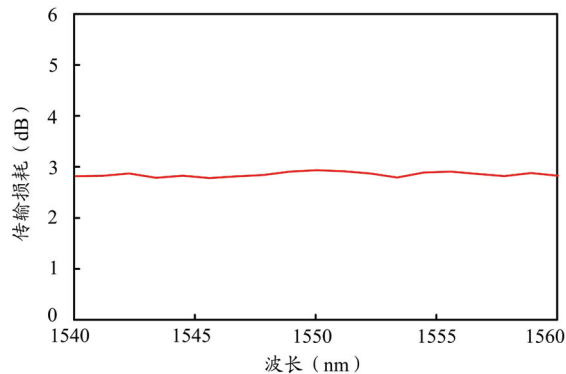


(a) 硫化铅掺杂石英玻璃光纤

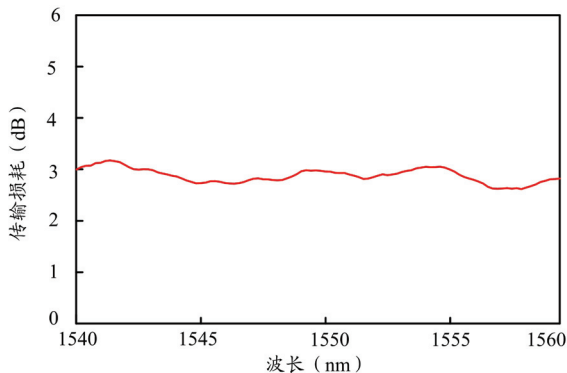


(b) 普通单模光纤

图3 光纤样品芯-包折射率差分布



(a) 硫化铅掺杂石英玻璃光纤



(b) 普通单模光纤

图4 光纤样品传输损耗谱

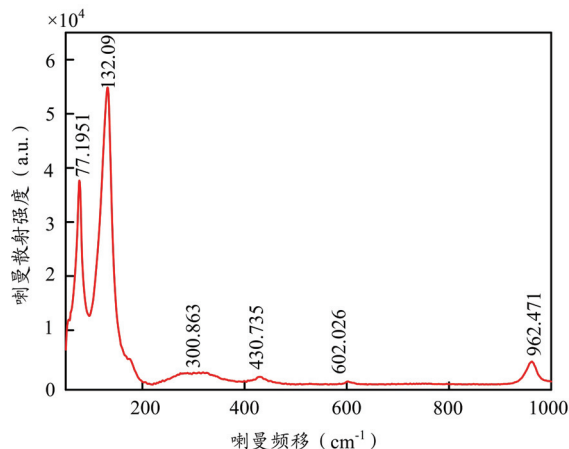


图5 硫化铅粉末喇曼光谱

和 962 cm^{-1} 处。其中 77 cm^{-1} 峰位出现的原因可能是激发光的等离子线造成的伪影^[12]; 132 cm^{-1} 峰位出现的原因是激光照射导致硫化铅粉末迅速升温,进而氧化为 $\text{PbO} \cdot \text{PbSO}_4$; 301 cm^{-1} 峰位是与 $3\text{PbO} \cdot \text{PbSO}_4$ 生成有关; 431 cm^{-1} 峰位与 $\text{v}_2(\text{SO}_4^{2-})\text{PbO} \cdot \text{PbSO}_4$ (v 表示测定水样硫酸根离子消耗乙二醇四乙酸二钠标准溶液的体积)的生成有关;而 602 cm^{-1} 峰位则与 $\text{v}_4(\text{SO}_4^{2-})\text{PbO} \cdot \text{PbSO}_4$ 的生成有关; 962 cm^{-1} 峰位的出现是由于 PbS 的光降解而生成了 $4\text{PbO} \cdot \text{PbSO}_4$ ^[13-15]。

实验测量了硫化铅掺杂石英玻璃光纤和普通单模光纤的喇曼光谱,并做比对分析。硫化铅掺杂石英玻璃光纤的包层部分是纯熔石英,纤芯部分则掺有氧化锆和硫化铅。其测量参数为:激发光为 633 nm 波长激光,功率为 3.684 mW ,曝光时间为 3 s ,波数扫描范围为 $50 \sim 1000\text{ cm}^{-1}$ 。具体实验步骤是:首先,将普通单模光纤固定于喇曼光谱测试系统(图1)的载物台上;然后,调整物镜使激光聚焦到普通单模光纤纤芯,以测量喇曼光谱;随后,更换为硫化铅掺杂石英玻璃光纤样品,重复上述测量步骤,最终测得2种被测光纤样品的喇曼光谱,结果如图6所示,并标出了相对应的喇曼峰位。

从谱形来看,硫化铅掺杂石英玻璃光纤和普通单模光纤喇曼峰位基本一致,其中,普通单模光纤主要有4个喇曼峰位,分别对应于 438 cm^{-1} 、 480 cm^{-1} 、 599 cm^{-1} 和 799 cm^{-1} 。 438 cm^{-1} 峰位对应 Si-O-Si 的六环呼吸振动; 480 cm^{-1} 峰位对应 Si-O-Si 的四环呼吸振动; 599 cm^{-1} 峰位对应 Si-O-Si 的三环呼吸振动; 799 cm^{-1} 峰位对应桥氧键弯曲振动^[9]。

从喇曼散射强度来看,硫化铅掺杂石英玻璃光纤

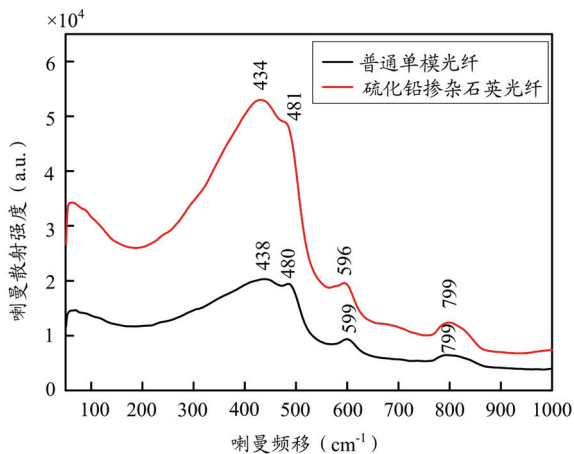


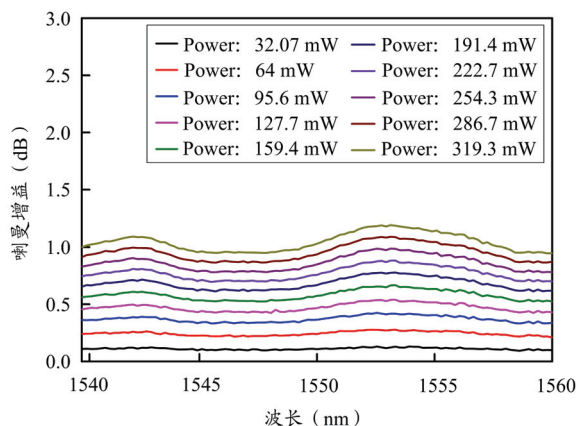
图6 硫化铅掺杂石英玻璃光纤和普通单模光纤喇曼光谱

的喇曼散射强度在各峰位上均高于普通单模光纤,特别是在 434 cm^{-1} 峰位的强度约为普通单模光纤的 2.6 倍。因此,在实际应用中,使用同样长度的光纤作为喇曼增益放大介质,硫化铅掺杂石英玻璃光纤将比普通单模光纤具有更大的增益效果。

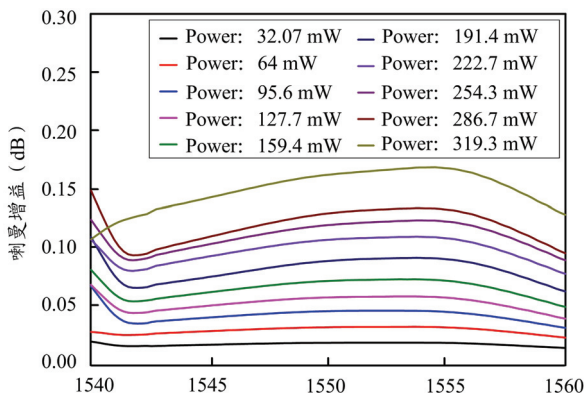
结合图 5 和图 6 中相应的喇曼峰位,硫化铅掺杂石英玻璃光纤喇曼峰强度增大的原由可分述如下:
 434 cm^{-1} 峰位强度的显著提高是由 $\nu_2(\text{SO}_4^{2-})\text{PbO}\cdot\text{PbSO}_4$ 的生成和 Si-O-Si 桥氧键六环呼吸振动的双重叠加所引起的; 596 cm^{-1} 峰位增强是由氧化物 $3\text{PbO}\cdot\text{PbSO}_4$ 合成与 Si-O-Si 三环桥氧键振动所引起的;由于光纤材料结构的原因,加快了硫化铅的光降解,同时叠加了桥氧键弯曲振动,引起了 799 cm^{-1} 峰位增强。由于硫化铅掺杂浓度较低,从谱形上未见有新的喇曼峰位。但是光纤中掺入硫化铅会改变光纤材料的光学性质,表现为硫化铅掺杂石英玻璃光纤的喇曼散射强度比普通单模光纤更大。

随后,本文利用光纤喇曼放大实验装置系统(如图 2 所示),研究了硫化铅掺杂石英玻璃光纤和普通单模光纤对光信号放大的影响。考虑波分复用(WDM)注入光限制,实验中最大输入泵浦光功率(图 7 中统一表示为 Power)约为 320 mW 。保持信号光输入功率不变,在不同泵浦光功率条件下,分别测得 2 种被测光纤样品的输出光功率。分析计算可得 2 种被测光纤在 $1540\sim 1560\text{ nm}$ 范围内的喇曼增益,如图 7 所示。可以看到,在相同泵浦光功率条件下,硫化铅掺杂石英玻璃光纤的喇曼增益明显大于普通单模光纤。

为了进一步比较硫化铅掺杂石英玻璃光纤和普通单模光纤喇曼增益的幅度变化,本文列出了 2 种光纤在 1550 nm 波长处不同泵浦光功率下光谱仪收集



(a) 硫化铅掺杂石英玻璃光纤



(b) 普通单模光纤

图7 硫化铅掺杂石英玻璃光纤和普通单模光纤喇曼增益谱

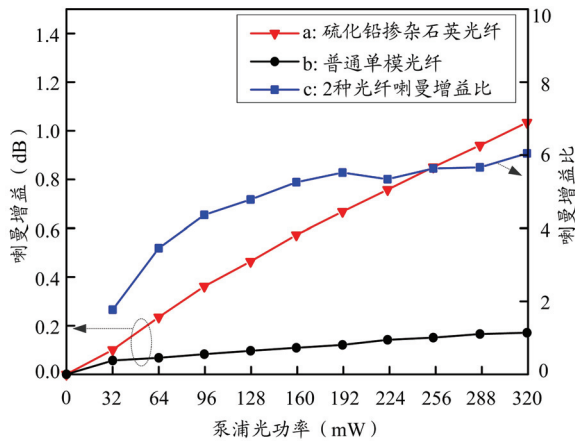


图8 1550 nm 波长下不同泵浦光功率时
硫化铅掺杂光纤和普通单模光纤增益谱

的光功率及其喇曼增益,如表 1 所示。2 种光纤的喇曼增益随泵浦光功率变化的变化情况如图 8 所示,图中的曲线 a 和 b 分别表示 1550 nm 处硫化铅掺杂石英玻璃光纤和普通单模光纤的喇曼增益曲线,曲线 c 是 2 种光纤的喇曼增益比。

表 1 1550 nm 波长处不同泵浦光功率下, 硫化铅掺杂光纤和普通单模光纤的信号光功率及喇曼增益

泵浦光功率 (mW)	PbS 掺杂石英玻璃光纤		普通单模光纤	
	信号光功率 (dBm)	喇曼增益 (dB)	信号光功率 (dBm)	喇曼增益 (dB)
0	-60.001	0	-60.001	0
32.07	-59.9	0.101	-59.984	0.017
64	-59.766	0.235	-59.971	0.030
95.6	-59.639	0.362	-59.957	0.044
127.7	-59.537	0.464	-59.945	0.056
159.4	-59.428	0.573	-59.930	0.071
191.4	-59.333	0.668	-59.913	0.088
222.7	-59.243	0.758	-59.895	0.106
254.3	-59.15	0.851	-59.763	0.119
286.7	-59.061	0.94	-59.872	0.129
319.3	-58.967	1.034	-59.838	0.163

结合表 1 和图 8 可以看出, 硫化铅掺杂石英玻璃光纤和普通单模光纤的喇曼增益随泵浦光功率增加而变大。在 1550 nm 处, 硫化铅掺杂石英玻璃光纤最大喇曼增益为 1.034 dB, 而普通单模光纤最大喇曼增益为 0.163 dB, 由此表明, 硫化铅掺杂石英玻璃光纤的喇曼增益远高于普通单模光纤, 最大可达 2.4 倍。同时, 2 种光纤 (硫化铅掺杂石英玻璃光纤/普通单模光纤) 的喇曼增益比随泵浦光功率的增加而变大。此外, 普通单模光纤平均单位泵浦光功率增益为 1.38 dB/W, 而硫化铅掺杂石英玻璃光纤单位泵浦光功率增益为 3.46 dB/W, 是普通单模光纤的 2.5 倍。

3 结束语

本文采用 MCVD 法制备出了长度为 239 m 的硫化铅掺杂石英玻璃光纤样品, 其芯层和包层折射率差约为普通单模光纤的 2 倍, 1550 nm 处的传输损耗为 2.97 dB。与普通单模光纤相比, 硫化铅的掺入增强了石英玻璃光纤喇曼散射强度, 在 50~1000 cm^{-1} 波数范围内, 硫化铅掺杂石英玻璃光纤的喇曼散射强度均高于普通单模光纤, 最大可达 2.6 倍。此外, 硫化铅掺杂

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

石英玻璃光纤的喇曼增益显著高于普通单模光纤, 最大可达 2.4 倍, 且平均单位泵浦光功率增益是普通单模光纤的 2.5 倍。研究结果表明: 石英玻璃光纤中掺入硫化铅可增强喇曼散射, 提高喇曼增益。因此, 硫化铅掺杂石英玻璃光纤可作为光纤喇曼放大器的增益光纤, 将在宽带和高速光纤通信中具有实际应用价值。

参考文献:

- [1] 唐嘉, 谢康, 姜海明, 等. 增益平坦喇曼放大器优化算法研究[J]. 光学与光电技术, 2008, 6(2): 25-28.
- [2] 单秀杰. 金属纳米颗粒掺杂的多组分磷酸盐玻璃光纤及其光学特性的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
- [3] 张徐亮. 分布式光纤喇曼放大器的理论和实验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [4] HREIBI A, GÉRÔME F, AUGUSTE J L, et al. PbSe quantum dots liquid-core fiber [C]//Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), May 16-21, 2010, San Jose, CA, USA. Piscataway: IEEE, 2010.
- [5] HREIBI A, GÉRÔME F, AUGUSTE J L, et al. Semiconductor-doped liquid-core optical fiber[J]. Optics Letters, 2011, 36(9): 1695-1697.
- [6] CHOI J H, SHI F G, MARGARYAN A A, et al. Optical absorption and emission properties of Nd^{3+} doped fluorophosphates glass for broadband fiber amplifier applications[J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2003, 4974: 106-111.
- [7] 孙震. 液芯光纤的研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2014.
- [8] YANG P, CHEN Z, CHEN N, et al. Raman scattering enhancement characteristic of NbCl_5 - and Nb_2O_5 -doped silica fibers [J]. Chinese Optics Letters, 2016, 14(10): 20-23.
- [9] 杨鹏祥, 陈振宜, 陈娜, 等. 铈锆共掺石英光纤预制棒喇曼光谱特性分析[J]. 科技与创新, 2016(16): 19-21.
- [10] 陈振宜, 郝平, 陈娜, 等. 铈酸锂掺杂石英光纤喇曼增强特性研究[J]. 光电子·激光, 2018, 29(11): 5-10.
- [11] 王文亮. 大功率光纤激光器受激喇曼散射研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2014.
- [12] GE J, WANG J, ZHANG H, et al. Orthogonal PbS nanowire arrays and networks and their Raman scattering behavior [J]. Chemistry - A European Journal, 2010, 11(6): 1889-1894.
- [13] BARANOV A V, BOGDANOV K V, USHAKOVA E V, et al. Comparative analysis of Raman spectra of PbS macro- and nanocrystals [J]. Optics & Spectroscopy, 2010, 109(2): 268-271.
- [14] OVSYANNIKOV S V, SHCHENNIKOV V V, CANTARERO A, et al. Raman spectra of $(\text{PbS})_{1.18}(\text{TiS}_2)_2$ misfit compound[J]. Materials Science & Engineering A, 2007, 462(1): 422-426.
- [15] SMITH G D, FIRTH S, CLARK R J H, et al. First- and second-order Raman spectra of galena (PbS)[J]. Journal of Applied Physics, 2002, 92(8): 4375-4380.

欢迎投稿 欢迎订阅 欢迎刊登广告