

高功率激光单模光纤远距离传输实验研究

禹化龙, 薛海中

(西安电子科技大学 技术物理学院, 陕西 西安 710071)

摘要: 受激拉曼散射(SRS)效应是制约高功率激光单模光纤远距离传输应用的瓶颈因素。采用 1550nm 非偏振连续波单模光纤激光器作为光源, 通过实验研究了不同注入光功率条件下经过 103km 单模光纤传输所产生的受激拉曼散射现象, 运用级联长周期光纤光栅带阻滤波器进行了受激拉曼散射抑制实验, 并进行了相应的理论分析。提出了光纤受激拉曼散射抑制有效性判据, 实验演示了受激拉曼散射现象, 验证了级联长周期光纤光栅带阻滤波器对受激拉曼散射抑制的有效性。

关键词: 高功率激光; 单模光纤; 级联长周期光纤光栅带阻滤波器; 受激拉曼散射(SRS)抑制; 光纤电能传输
中图分类号: TN25 **文献标识码:** A

Experimental study on long-distance transmission of high-power laser over single-mode fiber

YU Hua-Long, XUE Hai-Zhong

(School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Stimulated Raman Scattering (SRS) effect is a key factor restricting the application of high power laser transmission over single mode fiber in long distance. Using 1550nm unpolarized continuous wave single-mode fiber laser as light source, stimulated Raman scattering phenomenon generated by 103km single-mode fiber transmission under different injected light power conditions is experimentally studied. Cascaded long-period fiber gratings are used to carry out stimulated Raman scattering suppression experiments, and corresponding theoretical analysis is carried out. A criterion for the effectiveness of fiber stimulated Raman scattering suppression is proposed. Experiments demonstrate the stimulated Raman scattering phenomenon and verify the effectiveness of cascaded long-period fiber gratings for the suppression of stimulated Raman scattering.

Key words: high power laser, single mode fiber, cascaded long period fiber grating bandstop filter, stimulated raman scattering (SRS) suppression, power over fiber(PoF)

PACS:. 42. 55.

引言

近些年来,随着激光、通信、传感器以及集成电路技术的快速发展,光纤电能传输技术(PoF, Power over fiber)在一些特殊领域得到了应用。光纤采用玻璃材质,可长期工作,可靠性好,同时激光在光纤中传输,不受电磁干扰并能实现高电压隔离,有利于系统集成等,在某些特殊工作环境中,采用 PoF 技

术具有十分明显的优势^[1]。在 PoF 技术的应用中,注入到光纤中的激光功率越来越高^[2],传输距离也越来越远^[3-4],而光纤非线性效应则成为制约高功率激光光纤远距离传输的瓶颈因素^[5]。

影响 PoF 技术应用的光纤非线性效应主要包括受激布里渊散射(SBS)和受激拉曼散射(SRS)效应^[6]。SBS 效应将前向传输的激光能量转移给后向散射光和声子场,不仅会造成激光能量的传输损

收稿日期: 2019- 10- 15, 修回日期: 2019- 12- 18

作者简介(Biography): 禹化龙(1972-), 男, 河南新安人, 高级工程师, 博士研究生, 主要研究领域为: 激光能量传输及通信工程, E-mail: 13253523995@126. com

*通讯作者(Corresponding author): Email: 13253523995@126. com

Received date: 2019- 10- 15, Revised date: 2019- 12- 18

耗,而且在SBS效应严重时烧毁光纤及光源。SBS效应可通过提高光源的线宽等方法得到有效抑制,文献[7]研究表明,将光源线宽增加到0.07nm以上,可以有效地抑制SBS。

SRS效应通常会导致激光谱展宽到更长的波长,将会使激光传输损耗急剧增大,同时还会使传输至光电转换装置处的激光波长与光电转换材料的工作波长失配,从而使光电转换效率大大降低。对PoF系统而言,抑制SRS是一项重要挑战,尤其是在高功率激光单模光纤远距离传输情况下。迄今为止,研究人员考虑了多种抑制SRS的技术和设计,例如采用长周期光栅来衰减散射光束^[8]、光滤波^[9]、试图使用特殊的光纤来抑制SRS(包括谐振环设计^[10]和光子带隙光纤^[11])等。Christophe A. 等^[12]对用于高平均或高峰值功率的光能量光纤传输的受激拉曼散射(SRS)W型滤波光纤的特性进行了探索研究,使用不同的策略,研制的光纤具有宽的透射窗和SRS滤波,在拉曼斯托克斯波长下消光超过20dB。但上述方法仅对传输激光功率不太高、传输距离不太远的情况进行了研究。级联长周期光纤光栅带阻滤波器具有反射带宽范围大、附加损耗小、易集成于光纤,与光纤承受功率基本相当等特性,在高功率激光单模光纤远距离传输中抑制SRS具有独特的优势。对于激光能量单模光纤远距离传输而言,光纤传输物理损耗也是影响能量传输的关键环节。为了降低激光能量光纤远距离传输的物理损耗,选用1550nm激光器做为高功率激光光源与常用的硅光纤的传输损耗最低点相匹配以取得最佳的传输效率。本文以1550nm非偏振连续波单模光纤激光器作为光源,通过实验研究不同注入光功率条件下经过103km单模光纤传输所产生的受激拉曼散射现象,运用级联长周期光纤光栅进行受激拉曼散射抑制实验,并进行相应的理论分析。实验演示了受激拉曼散射现象,并验证了级联长周期光纤光栅对受激拉曼散射抑制的有效性。

1 光纤受激拉曼散射实验及结果分析

1.1 光纤受激拉曼散射实验装置

光纤受激拉曼散射实验如图1所示。实验中采用AFL-1550-40-R-NC型非偏振连续单模输出功率可调、最大输出功率为10W的光纤激光器,激光器尾纤为SMF-28e单模光纤,中心工作波长为1550nm,线宽3nm。实验中采用的SMF-28e单模光纤,在波长1550nm处的模场直径为10.4 μ m。采用AV6362型光谱仪对光纤输出端光谱进行测量,其有效测量范围为600~1700nm,采用PM100D型(探头型号S322C)光功率计对光纤输出端光功率进行测量。激光器与光隔离器、光隔离器与光纤、光纤与长周期光栅之间用熔接方式连接,光纤与光谱仪、光功率计之间用FC型连接器实现互连,光谱仪设置分辨率为0.34nm,采样点数501,光谱测试范围为1530~1700nm。

1.2 实验结果及分析

根据图1搭建光纤受激拉曼散射实验装置,调整激光器的输出功率,观察注入光纤的激光功率由50mW增加到10W,经过单模光纤传输103km后输出光谱和输出光功率的变化情况,实验结果如图2和图3所示。从图2可见,注入光纤的激光功率在500mW以下,基本上看不到受激拉曼散射现象,但随着注入光纤的激光功率的增大,受激拉曼散射现象越来越严重。在注入光纤的激光功率为10W时,在1640nm~1685nm很宽的光谱范围内形成包络峰值。从光谱仪的输出结果可以看出,注入光纤的绝大部分激光能量由波长1550nm转移到1640~1685nm。

根据受激拉曼散射理论,假设拉曼增益谱为洛仑兹形,注入光纤的激光和斯托克斯波的偏振方向在光纤中保持不变时,受激拉曼散射阈值功率可近似为^[6]

$$P_{th}^{SRS} \approx \frac{16A_{eff}}{G_R L_{eff}}, \quad (1)$$

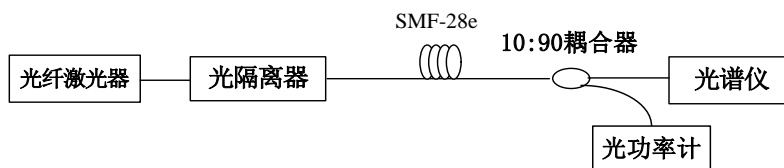


图1 受激拉曼散射实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of stimulated Raman scattering experimental device

其中, $G_{R(max)} = \frac{9.75 \times 10^{-14}}{\lambda}$, $L_{eff} \approx 1/\alpha_p$ 。

在 $\lambda_p = 1550nm$ 时, $\alpha_p=0.2dB/km$, $L_{eff} \approx 20km$, $A_{eff} = 80\mu m^2$, 可求得 $P_{th}^{SRS} \approx 900mw$ 。

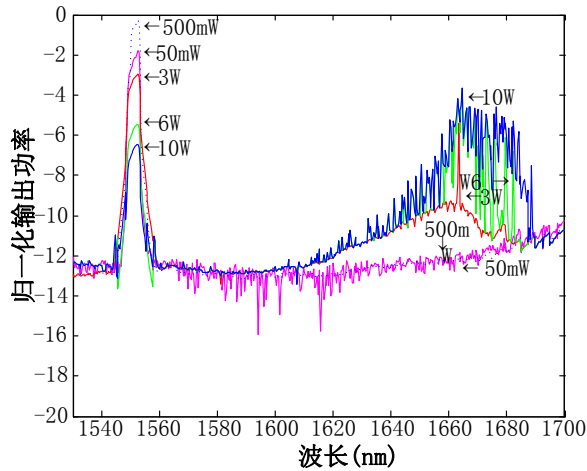


图2 不同注入光功率情况下的受激拉曼散射实验输出光谱图

Fig. 2 Output spectrum of stimulated Raman scattering experiment under different injected light powers

因此,当注入光功率小于 900mw 时,不会产生明显的受激拉曼散射现象。图3中蓝色实线给出了注入光功率为 50mw、500mw、3W、6W 和 10W 时经过单模光纤传输 103 km 后的光功率。由图3中可以看出,当注入光功率分别为 50mw、500mw 时,输出光功率与输入光功率呈正比例变化。当注入光功率分别为 3W、6W 和 10W 时,由于有明显的受激拉曼散射现象产生,所以,随着注入光纤光功率的增加,输出的激光能量逐渐集中在 1640nm~1685nm 范围内(结合图2),而在 1550nm 附近输出的光功率快速下降。

2 光纤受激拉曼散射抑制实验及结果分析

2.1 光纤受激拉曼散射抑制实验装置

根据图4搭建光纤受激拉曼散射抑制实验装置,级联长周期光纤光栅带阻滤波器插入损耗

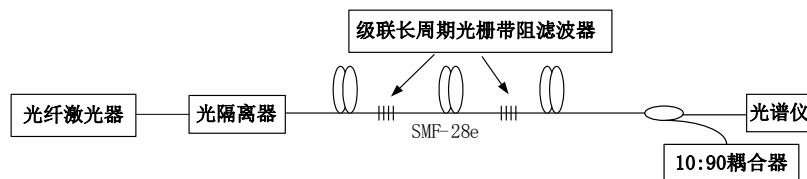


图4 光纤受激拉曼散射抑制实验装置示意图

Fig. 4 A schematic diagram of an experimental device for optical fiber stimulated Raman scattering suppression

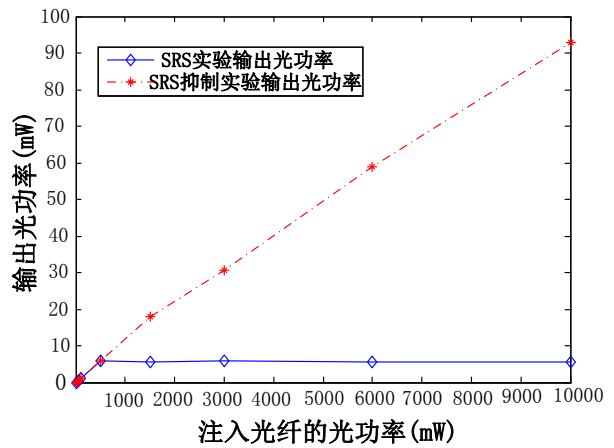


图3 不同注入光功率情况下的受激拉曼散射及抑制实验输出光功率

Fig. 3 Stimulated Raman scattering and suppression of experimental output optical power under different injected optical powers

0.3dB/km@1550nm, 阻带 1645~1670 nm 内反射率 $\geq 15dB$, 如图5所示,激光器、光纤和光谱仪等同图1,光纤激光器与光隔离器、光隔离器与光纤、光纤与级联长周期光栅之间用熔接方式连接,光纤与光谱仪之间用FC型连接器实现互连,光谱仪设置分辨率为 0.34nm,采样点数 501,频谱测试范围是 1530~1700nm。

2.2 实验结果及分析

调整激光器的输出功率,观察注入光纤的激光功率由 50mW 增加到 10W,经过单模光纤传输 103km 后输出光谱和输出光功率的变化情况,实验结果如图3和图6所示。从图6可见,注入光纤光功率由 50 mW 增加到 10 W 时,从输出光谱上看,激光能量主要集中在 1550nm 附近。图3中红色点划线给出了注入光功率为 50mw、500mw、3W、6W 和 10W 时经过单模光纤传输 103 km 后的光功率。由图3中可以看出,输出光功率随着注入光纤光功率的增加而呈线性增大。

在硅光纤中,拉曼散射可看作是光纤介质中的分子振动对注入光纤激光的调制,从而对注入光纤

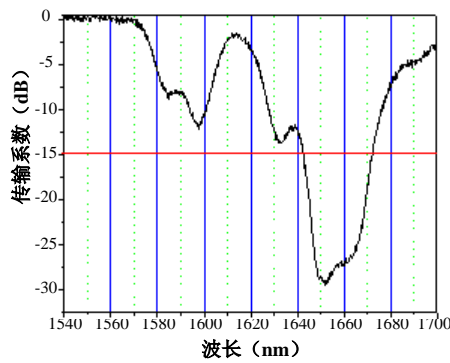


图5 级联长周期光纤光栅带阻滤波器的传输特性曲线

Fig. 5 transmission characteristic curve of cascaded long-period fiber grating band-stop filter

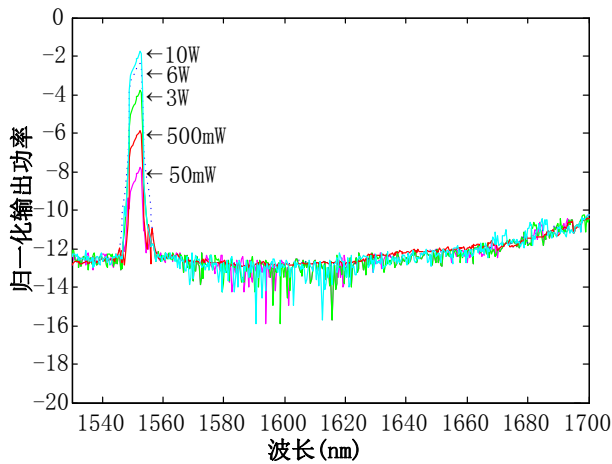


图6 不同注入光功率情况下的受激拉曼散射抑制实验输出光谱图

Fig. 6 output spectra of stimulated Raman scattering suppression experiments under different injected light powers

的激光产生散射作用,主要斯托克斯(Stokes)散射和反斯托克斯散射。这些散射光的谱线相对于注入射光纤激光谱线的移动呈规律性的,只与硅光纤组成介质的分子结构有关。受激拉曼散射效应产生拉曼增益的显著特征是,有一个很宽的频率范围(可达40THz),且在13.2THz附近呈现一个比较宽的峰值^[6]。也就是说, G_R 最大值的频率分量下移距注入光纤的激光光频率约13.2THz处(对应波长为1663nm)。受激拉曼散射的斯托克斯光强 I_s 的增加与注入光纤的激光功率和光纤介质中的分子振动强度 I_0 的积成正比,可用式(2)表示

$$dI_s = G_R I_0 I_s dL \quad (2)$$

式中, L 为光纤的长度。

求解式(2)微分方程,可得

$$I_s(L) = I_s(0) e^{G_R I_0 L} \quad (3)$$

写作光功率的形式

$$P_s(L) = P_s(0) e^{G_R I_0 L} \quad (4)$$

采用衰减幅值为 A 的宽阻带滤波器阻止斯托克斯光的迭加和放大,则

$$P_s(L) = \frac{P_s(0)}{A} e^{G_R I_0 L} \quad (5)$$

即斯托克斯光功率可降低 A 倍,可有效抑制斯托克斯光的累积、放大作用,从而使光纤受激拉曼散射得到有效抑制。由图6的实验结果可以看出,在较大的注入光功率情况下(3W、6W和10W),实验中输出的光谱没有明显的受激拉曼散射谱产生,较好地抑制了斯托克斯光的累积、放大作用。由此可见,运用级联长周期光纤光栅带阻滤波器对高功率激光远距离单模光纤传输具有明显的抑制作用。

3 光纤受激拉曼散射抑制有效性判据

由光纤受激拉曼散射实验可知,受激拉曼散射使注入光纤的激光能量转移至范围很宽的光谱范围内,输出的激光功率与注入光纤的激光功率呈非线性变化。据此,提出光纤受激拉曼散射抑制有效性判据:

一是从注入光纤的光功率与输出的光功率之差是否为光纤物理损耗(包括级联长周期光纤光栅滤波器、光隔离器及熔接点等损耗);

二是从输出光谱上看,输出激光能量是否主要集中在1550nm,而在1620~1685nm范围内无明显包络峰值产生。

在本实验中,光功率损耗预算如表格1所示。注入10W(40dBm)激光的条件下,经过103km单模光纤传输后,光纤链路损耗为输出光功率为20.75dB。输入与输出光功率差为

$$40\text{dBm}(10\text{W}) - 19.7\text{dBm}(93\text{mW}) = 20.3\text{dB}$$

在忽略误差的情况下,实验中注入光纤的光功率与输出的光功率之差为光纤物理损耗(20.75dB),满足光纤受激拉曼散射抑制有效性判据条件一。

输出光谱集中在1550nm,且在1620~1685nm范围内无明显包络峰值产生,如图6所示。

由此可以判断:光纤受激拉曼散射得到了有效抑制。

4 结论

通过实验研究了不同注入光功率条件下经过103km单模光纤传输所产生的受激拉曼散射现象,

表 1 光功率损耗预算表

Table 1 Optical Power Loss Budget Table

接插件	单位损耗/ km	个数	损耗小 计
级联长周期光纤光栅带阻滤波器	0.3dB	3	0.9dB
光纤损耗	0.185dB	103	19.05dB
熔接点损耗0.1dB	0.1dB	6	0.6dB
FC接头	0.2dB	1	0.2dB
总计			20.75dB

运用级联长周期光纤光栅进行了受激拉曼散射抑制实验,并进行了相应的理论分析。提出了光纤受激拉曼散射抑制有效性判据,实验演示了受激拉曼散射现象,验证了级联长周期光纤光栅对受激拉曼散射抑制的有效性。实验结果与理论分析基本吻合,对于实现高功率激光远距离单模光纤传输及其在 PoF 中的应用具有重要意义。

Reference

- [1] J. D. López-Cardona, Remote Optical Powering Using Fiber Optics in Hazardous Environments [J], *Journal of Lightwave Technology*, 2018, **36**(3):748-754
- [2] Nana Tajima, Daisuke Kamiyama, 150-Watt Power-over-Fiber Feed for Bidirectional Radio-over-Fiber Systems Using a Double-Clad Fiber [C], 2019 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), San Diego, CA, USA, IEEE, 2019, W11.7-10
- [3] E. Dimitriadou, Modeling of a 10-km optical link exploiting power over fiber for cabled submarine Observatories [J], *Optical Engineering*, 2017, **56**:11-14
- [4] Hidehiko Takara, Hirotaka Ono, Yoshiteru Abe, 1000-km 7-core fiber transmission of 10 x 96-Gb/s PDM-16QAM using Raman amplification with 6.5 W per fiber, [J], *Optics Express*, 2012, **20**(9):9-13
- [5] E. Dimtrladou, Laura Ghisa, VÉRONIQUE Quintard, Modeling of a 10-km optical link exploiting power over-fiber for cabled submarine observatories [J], *Optical Engineering*, 2017, **56**(11):1-4
- [6] GOVIND P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics* [M], 2007, Academic Press, San Diego, California, USA, 273-279
- [7] Z. ZHANG, X. ZHOU, Z. SUI, Numerical analysis of stimulated inelastic scatterings in ytterbium-doped double-clad fiber amplifier with multi-ns-duration and multi-hundred-kW peak power output [J], *Opt. Comm*, 2009, **282**(10):1186-1190.
- [8] D. NODOP, C. JAUREGUI, F. JANSEN, Suppression of stimulated Raman scattering employing long period gratings in double-clad fiber amplifiers [J], *Opt. Lett.*, 2010, **35**(17):2982-2984.
- [9] McIntosh Christopher Michael, Stimulated Raman scattering threshold enhancement in silica-based optical fibers via filtering techniques [D], Source DAI-B(61/11, Lehigh University, 2001
- [10] J. Kim, C. Dupriez, Suppression of stimulated Raman scattering in a high power Yb-doped fiber amplifier using a W-type core with fundamental mode cut-off [J], *Opt. Express*, 2006, **14**(12):5103-5113.
- [11] M. Kashiwagi, Effectively single-mode all-solid photonic bandgap fiber with large effective area and low bending loss for compact high power all-fiber lasers [J], *Opt. Express*, 2012, **20**(14):15061-15070.
- [12] Christophe A, Resonant SRS Filtering Fiber for High Power Fiber Laser Applications [J], *IEEE Journal Of Selected Topics In Quantum Electronics*, 2018, **24**(3):0901509-12