

文章编号: 0253-2239(2010)s100308

非线性光纤器件的损耗性能测量

文 峰 武保剑 李 智 罗 特

(电子科技大学宽带光纤传输与通信网技术教育部重点实验室, 四川 成都 611731)

摘要 从损耗角度分析了影响非线性光纤器件性能的因素。讨论了插入损耗、回波损耗和固有损耗随入射光功率的变化规律。当在高功率情况下,受激布里渊散射(SBS)会导致非线性光纤的插入损耗随注入光功率线性增加,其斜率与 SBS 转换效率有关。比较高非线性光纤缠绕在不同半径线盘时损耗的变化,以及它对 SBS 阈值和四波混频转换效率的影响。研究表明,高非线性光纤采用直径为 7 cm 的线盘缠绕时基本上不会影响非线性光纤器件的性能,这为设计沿光纤轴向提供磁场的螺绕环装置提供了重要参考,对下一步开展非线性磁光光纤特性的研究也有指导意义。

关键词 光学器件;损耗;受激布里渊散射;四波混频;高非线性光纤

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201030.s100308

Loss Performance of Optical Devices Based on High Nonlinear Fibers

Wen Feng Wu Baojian Li Zhi Luo Te

(Key Lab of Broadband Optical Fiber Transmission and Communication Networks, Ministry of Education, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China)

Abstract The key factors of nonlinear fiber devices are analyzed from the loss aspect. The dependences of insertion loss, reflection loss and intrinsic loss on the input optical power are studied. In the case of high input optical power, the insertion loss is proportional to the input optical power due to the stimulated Brillouin scattering (SBS), and the slope is related to the SBS efficiency. The changes of loss are measured in fiber spools with different diameters. The SBS threshold and the efficiency of four-wave mixing (FWM) in the fiber spool with small diameter are also investigated experimentally. The results indicate that the nonlinear performance of optical devices with a 7cm-diameter fiber spool is basically the same as that of the fiber spool with the conventional diameter, which helps to design the toroidal coil with the magnetic field along the fibers and analyze the characters of the nonlinear magneto-optic fiber.

Key words optical device; loss; stimulated Brillouin scattering; four-wave mixing; high nonlinear fiber

OCIS codes 230.4320; 290.5900; 190.4380; 060.4370

1 引 言

基于高非线性光纤的全光器件利用光纤三阶电极化率 $\chi^{(3)}$ 的飞秒级响应速度,可以实现 T bit 量级的超高速光开关和光交换功能,在下一代智能光网络中具有广泛的应用前景^[1,2]。利用高非线性光纤的自相位调制(SPM)、交叉相位调制(XPM)和四波混频(FWM)等非线性效应还可以实现全光 2R/3R 再生^[3,4]、码型转换^[5]和波长转换^[6]等光信息处理器

件。人们通常把精力放在优化光纤品质因素(FOM)和相关滤波器参数方面,以改善器件的非线性幅度转移函数^[7,8]。而较少关注与非线性光纤器件性能密切相关的损耗特性,包括高功率注入情况下损耗对输入光功率的依赖关系。本文将通过这方面的研究,以引起人们对非线性光纤器件功率利用率的关注。

另一方面,尽管光纤的非线性系数可以达到

收稿日期: 2010-07-22; 收到修改稿日期: 2010-10-12

基金项目: 国家 863 计划(2009AA01Z216)和新世纪优秀人才支持计划(NECT-08)资助课题。

作者简介: 文 峰(1982—),男,博士研究生,主要从事全光信号处理方面的研究。E-mail: fengwen@uestc.edu.cn

导师简介: 武保剑(1970—),男,博士,教授,主要从事光通信方面的研究。E-mail: bjwu@uestc.edu.cn

100~2000 W⁻¹/km,但这些超高非线性光纤,如高非线性硅基光子晶体光纤^[9,10]、硫化物光纤^[11,12]、铋酸盐光纤^[13]等的制作工艺还不成熟,存在色散不可控、损耗大、与单模光纤耦合困难等因素而限制了它们的使用。目前得到广泛应用的光纤仍然是普通高非线性光纤,该类光纤是通过掺杂等技术提高硅基光纤非线性系数。常用的普通高非线性光纤的非线性系数约在 10 W⁻¹/km 左右,并能够根据需要定制零色散、负色散、正色散的高非线性光纤,光纤设计和拉制工艺成熟。但由于其非线性系数不高,在器件应用中需要数百米,这样光纤缠绕尺寸不但会影响光器件的体积,不同程度的光纤弯曲也会影响非线性光纤器件的性能。在基于磁光光纤的相关研究中,也会遇到类似的问题。例如,当使用螺绕环给光纤加载磁场时,由于螺绕环内磁场强度随着环半径的增加而减少,为保证一定的磁场强度需要控制环的尺寸,这就限制了光纤的缠绕半径^[14]。

本文主要分析了在高功率注入情况下,由于光纤非线性效应引起的光纤损耗随入射功率变化的依赖关系,同时测量了光纤缠绕在小半径线盘下的损耗变化,并以受激布里渊散射(SBS)和 FWM 为例,分析了小半径线盘缠绕对非线性效应的影响。

2 非线性光纤器件的损耗分析

普通单模光纤主要用于信号传输,通常无需考虑高功率注入的情况,但对于非线性光纤却涉及非线性散射引起的功率反射问题。高非线性光纤作为无源材料,需要注入高功率才能在相对较短的光纤内得到预期的 SPM、XPM 等效应,此时会引起光纤的 SBS、SRS 等非线性效应,它们的阈值在单模光纤中分别为毫瓦和瓦量级,因此引起高非线性光纤功率反射的主要因素为 SBS 效应。研究表明反射区域主要集中在光纤前端 20% 的长度范围内^[15],这严重影响了实际进入高非线性光纤的入射光功率,限制了光纤器件性能。本文主要通过考察高非线性光纤的插入损耗、回波损耗和固有损耗随入射光功率的变化规律来说明非线性光纤器件的损耗问题。下面以 ITU-T 规定的通信波长 1552.52 nm 为例测量高非线性光纤的损耗变化,实验结构如图 1 所示。线宽小于 0.1 nm 的 1552.52 nm 连续光通过普通掺铒放大器(EDFA)放大后进入高功率光放大器(HP-EDFA),所产生的高功率信号经 50:50 耦合器注入到由长飞光纤光缆有限公司提供的 1220 m 负色散高非线性光纤(HNLF, NL-1550-NEG),其中

P1 端口监控入射功率,P3 端口监控反射功率;输出光采用 99:1 分光器的 P2 端口监控透射功率。功率测量使用手持式光功率计测得,不确定度在 ±5% 以内。实验分别对高非线性光纤和 0.5 m 光纤跳线进行了比对测量,插入损耗、回波损耗和固有损耗分别定义如下:

$$\begin{cases} \text{Insertion Loss: } 10 \times \lg\left(\frac{P_{\text{In}}}{P_{\text{Tr}}}\right), \\ \text{Reflection Loss: } 10 \times \lg\left(\frac{P_{\text{In}}}{P_{\text{Re}}}\right), \\ \text{Intrinsic Loss: } 10 \times \lg\left(\frac{P_{\text{In}}}{P_{\text{Tr}} + P_{\text{Re}}}\right), \end{cases}$$

式中 P_{In} 为入射功率, P_{Tr} 为透射功率, P_{Re} 为反射功率。

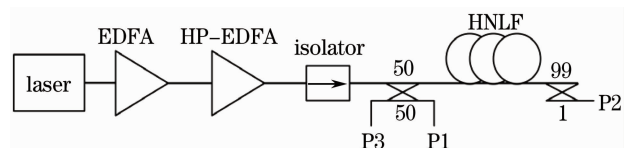


图 1 损耗测试结构

Fig. 1 Scheme of loss measurement

回波损耗能够反映出非线性光纤器件的正向功率传输能力,而插入损耗给出了器件的总体衰减,固有损耗则体现了光纤本身的固有衰减以及与单模光纤的耦合损耗。实验测量得到的插入损耗、回波损耗和固有损耗结果如图 2 所示。由于非线性光纤与普通单模光纤结构不一致,存在模场失配问题,因此回波损耗整体低于单模跳线情况。在低功率注入情况下,高非线性光纤的插入损耗和回波损耗基本保持不变,此时的插入损耗与固有损耗相等,主要由光纤的固有衰减以及与单模光纤的耦合损耗构成;而当入射光功率高于 10 dBm 以后,由于 SBS 效应增加了反射光功率,这导致插入损耗增加、回波损耗降低,当入射功率达到 17.1 dBm 以后,反射光功率超过透射光功率,表现为回波损耗低于插入损耗,即非线性光纤器件的功率利用能力急剧降低。测试同时发现,在高功率范围内光纤插入损耗与入射光功率成线性依赖关系,其斜率与光纤 SBS 转换效率有关(此处约为 0.84 dB/dBm)。实验表明由于 SBS 效应的存在严重影响了进入高非线性光纤的实际光功率,会对功率依赖的非线性光纤器件产生影响。为了抑制 SBS 引起的回波损耗,注入光纤的光信号可以先使用相位调制或频率调制方法进行预处理^[3],通过增加抽运信号线宽以达到提高 SBS 阈值的目的。

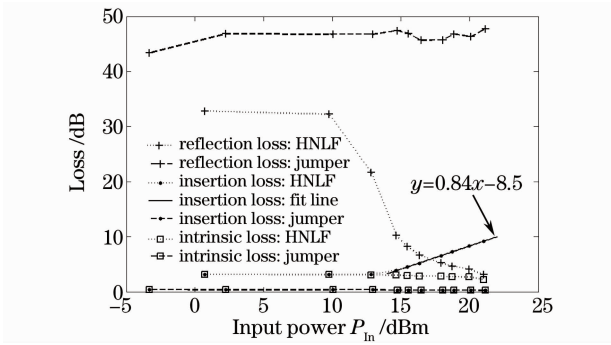


图 2 非线性光纤器件的损耗特性

Fig. 2 Loss performance of optical devices based on high nonlinear fibers

3 高非线性光纤的小半径线盘缠绕

为了将基于高非线性光纤的全光器件集成在一个较小的装置内,研究高非线性光纤在小半径线盘

缠绕情况下的非线性特性具有现实意义。下面通过对比将高非线性光纤分别缠绕在直径为 15 cm 和 7 cm 线盘的损耗、SBS 阈值、FWM 转换效率,说明非线性光纤器件小型化的可行性。

传统认为光纤缠绕在直径为 15 cm 线盘上可以忽略光纤的宏弯曲损耗,因此实验中将一根长度为 500 m 的长飞高非线性光纤(NL-1550-ZERO)从 15 cm 线盘逐渐缠绕到一个 7 cm 线盘上[图 3(a)插图]。当缠绕在小半径线盘上的光纤长度为 L 时,使用图 1 相同的测试结构测量出插入损耗的变化,如图 3 所示。通过与 15 cm 线盘结果($L=0$ 时的曲线)比较发现,小半径缠绕并没有改变 SBS 阈值。图 3(b)给出了缠绕过程中相对于 $L=0$ 时插入损耗的变化(Induced Insertion Loss),可以看出 7 cm 线盘缠绕增加了光纤的整体损耗,但损耗增加幅度在 0.6 dB 以内。

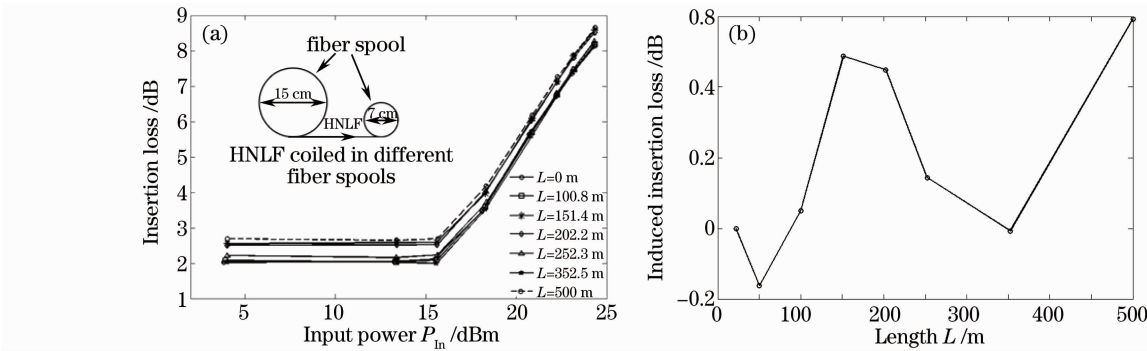


图 3 小半径线盘缠绕下的损耗结果。(a)插入损耗,(b)损耗变化

Fig. 3 Loss in the fiber spool with small diameter. (a) insertion loss, (b) induced insertion loss

下面以 FWM 为例,测试小半径线盘缠绕对非线性效应的影响,FWM 测试结构如图 4 所示。光源 1 产生波长 $\lambda_p = 1552.52$ nm 的连续光,通过 EDFA 预放大后进入高功率放大器得到抽运光,光源 2 产生波长 $\lambda_s = 1554.13$ nm 的连续光,放大后作为信号光和抽运光通过 50:50 耦合器进入缠绕在直

径为 7 cm 线盘上的 500 m 零色散高非线性光纤,输出端通过光谱仪(OSA)观察 FWM 光谱(图 4 插图),并由解复用器得到波长转换光。实验结果与 500 m 高非线性光纤全部缠绕在 15 cm 线盘时的 FWM 测试结果进行了对比。光功率测量使用手持式光功率计完成,功率计的不确定度在 $\pm 5\%$ 以内。

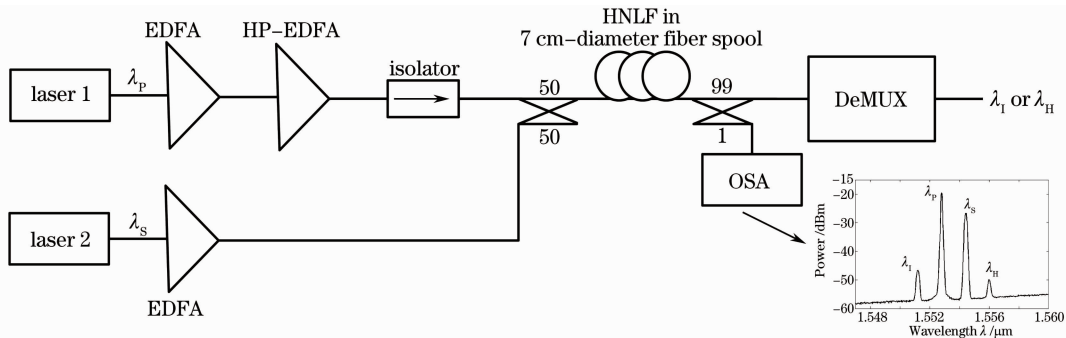


图 4 小半径缠绕下的 FWM

Fig. 4 Experimental block diagram for FWM in the 7cm-diameter fiber spool

实验中信号光在进入 50:50 耦合器前功率保持 12.7 dBm 不变,而通过调整抽运功率测量 FWM 产生的闲频光 λ_1 和高阶 FWM 光 λ_H 功率变化。为了减少测量误差,在 7 cm 线盘情况下进行了 3 次测量,结果如图 5 所示。由测量结果可以看出,在相同抽运功率下,闲频光可以得到与 15 cm 线盘情况一致的转换效率,而高阶 FWM 光转换效率有近 1.2 dB 的减少,这是因为小半径线盘缠绕引起的额外光纤损耗影响了信号光进入高非线性光纤的实际功率。实际测量表明,只要弥补小线盘缠绕下光纤

额外损耗引起的注入功率衰减,同样可以得到大线盘缠绕下的非线性效果。但需要指出的是,如果缠绕半径进一步大幅减少,实验测试中将上述高非线性光纤缠绕在直径为 2.5 cm 的线盘上时,光纤的插入损耗比 15 cm 线盘情况增加了 15 dB 以上,此时非线性光纤器件由于损耗增加而失去了使用价值。总之,采用 7 cm 线盘缠绕高非线性光纤,基本上不会影响 FWM 的效果,这为设计螺绕环提供了重要参考,对下一步开展非线性磁光光纤特性的研究也有指导意义。

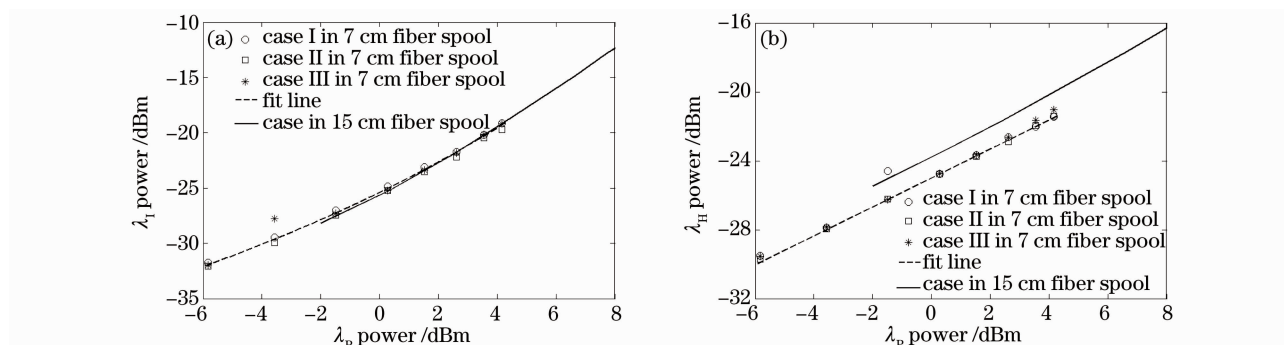


图 5 FWM 转换效率。(a)空闲光 λ_1 , (b)高阶 FWM 光 λ_H

Fig. 5 Efficiency of FWM for (a) idle light λ_1 , (b) higher-order FWM light λ_H

4 结 论

实验测量了非线性光纤器件的插入损耗、回波损耗和固有损耗随入射光功率的变化规律,分析了由于 SBS 效应对该类型器件光功率利用率的影响。从光纤器件小型化的角度,比较了高非线性光纤缠绕半径减少一半情况下的 SBS 和 FWM 特性。测量结果说明,适当提高入射光功率弥补光纤损耗的增加可以获得与光纤大半径缠绕下相同的非线性效果。这为改善非线性光纤器件性能提供指导,并进一步证明了磁光光纤实验的可行性。

参 考 文 献

- Hans-Georg Weber, Masataka Nakazawa. Ultrahigh-Speed Optical Transmission Technology [M]. New York: Springer, 2007. 141~164
- Yang Guangqiang, Zhang Xia, Ren Xiaomin *et al.*. Experimental research on all-optical switch based on photonic crystal fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(12): 1650~1653
杨广强, 张霞, 任晓敏等. 基于光子晶体光纤的全光开关实验研究 [J]. *中国激光*, 2005, **32**(12): 1650~1653
- Chris Ito, John C. Cartledge. Polarization independent all-optical 3R regeneration based on the Kerr effect in highly nonlinear fiber and offset spectral slicing [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant.*, 2008, **14**(3): 616~624
- Han Bingchen, Yu Jinlong, Luo Jun *et al.*. Experimental research on dual wavelength all-optical decision based on fiber-optical parametric amplifier [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010,

30(6): 1576~1580

- 韩丙辰, 于晋龙, 罗俊等. 利用光参变放大同时实现双波长全光判决的实验研究 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(6): 1576~1580
- Han Bingchen, Yu Jinlong, Luo Jun *et al.*. Multi-channel all-optical non-return-to-zero to return-to-zero format converter based on fiber optical parametric amplifier [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2962~2965
韩丙辰, 于晋龙, 罗俊等. 基于光纤光参量放大的多通道全光非归零/归零码转换器 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 2962~2965
 - Takuo Tanemura, Ju Lee, Dexiang Wang *et al.*. Polarization-insensitive 160-Gb/s wavelength converter with all-optical repolarizing function using circular-birefringence highly nonlinear fiber [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(4): 1408~1412
 - M. Rochette, J. N. Kutz, J. L. Blows *et al.*. Bit-error-ratio improvement with 2R optical regenerators [J]. *IEEE Photonic. Tech. L.*, 2005, **17**(4): 908~910
 - Jesper Mork, Filip Öhman, Svend Bischoff. Analytical expression for the bit error rate of cascaded all-optical regenerators [J]. *IEEE Photonic. Tech. L.*, 2003, **15**(10): 1479~1481
 - T. Hasegawa, T. Nagashima, S. Ohara *et al.*. SPM-induced spectral broadening in Bismuth-based photonic crystal fiber [C]. OFC/NFOEC 2007, JWA6/1~JWA6/3, Anaheim, California
 - Wu Ming, Liu Hairong, Huang Dexiu. Dispersion property in highly nonlinear photonic crystal fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 539~542
吴铭, 刘海荣, 黄德修. 高非线性光子晶体光纤色散特性的研究 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(3): 539~542
 - L. B. Fu, M. Rochette, V. G. Ta'eed *et al.*. Investigation of self-phase modulation based optical regeneration in single mode As₂Se₃ chalcogenide glass fiber [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(19): 7637~7644

- 12 Zou Lin'er, Chen Baoxue, Chen Lin *et al.*. Study on As_2S_8 glass stripe waveguide fabrication using illumination[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7): 1043~1047
邹林儿, 陈抱雪, 陈 林 等. As_2S_8 玻璃条形波导的光激励法制备技术研究[J]. 光学学报, 2006, **26**(7): 1043~1047
- 13 Ju Han Lee, Kazuro Kikuchi. All-fiber 80-Gbit/s wavelength converter using 1-m-long Bismuth Oxide-based nonlinear optical fiber with a nonlinearity γ of $1100 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$ [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(8): 3144~3149
- 14 T. Yoshino, M. Yokota, T. Kenmochi. High-speed all-fibre polarisation controller [J]. *Electron. Lett.*, 2003, **39**(25): 1800~1802
- 15 Govind P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics* [M]. Singapore: Elsevier, 2004. 362~364