

单模光纤中四波混频对受激拉曼散射影响的研究

张鹏^{1,2}, 田春林², 乔勇², 吕栋栋²

¹ 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;

² 长春理工大学机电工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 采用最大峰值功率为 50 MW 的 531.81 nm 脉冲激光作为抽运光源, 抽运长度为 500 m 石英单模光纤 (SMF) 产生受激非线性效应。基于非线性光学理论、光纤传输理论以及实验测量数据, 研究了四波混频 (FWM) 效应对受激拉曼散射 (SRS) 光谱结构的影响, 并给出了 SRS 和 FWM 效应在石英 SMF 中的传输模式。研究结果表明: 在石英 SMF 中, FWM 效应会诱导 SRS 效应的低阶斯托克斯光产生附加峰谱线, 同时促使 SRS 的高阶斯托克斯光谱线产生光谱展宽效应, 从而导致 SRS 的高阶斯托克斯光谱线发生频移。

关键词 非线性光学; 单模光纤; 四波混频效应; 受激拉曼散射

中图分类号 O437.7 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.061901

Four Wave Mixing Effect on Simulated Raman Scattering in Single Mode Fiber

Zhang Peng^{1,2}, Tian Chunlin², Qiao Yong², Lü Dongdong²

¹ School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

² College of Mechanical and Electric Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract Pulse laser with 50 MW maximum peak power and wavelength of 531.81 nm is used to pump 500 m silica single mode fiber (SMF) in order to induce the stimulated nonlinear effect. Based on the nonlinear optics theory, optical fiber transmission theory and experimental measured data, effect of the four-wave mixing (FWM) on the spectral structure of stimulated Raman scattering (SRS) is studied. And the transmission modes of SRS and FWM in the silica SMF are also presented. Research results show that in the silica SMF, FWM effect is able to induce the low order Stokes light of SRS to produce additional peak spectral lines. Meanwhile the spectral broadening effect of the high order Stokes spectral lines of SRS can also be produced, and this could finally lead to frequency shift of the high order Stokes spectral lines of SRS.

Key words nonlinear optics; single mode fiber; four wave mixing effect; stimulated Raman scattering

OCIS codes 190.4380; 060.2430; 290.5910

1 引言

1972年, Stolen首次在光纤中观察到受激拉曼散射(SRS)现象。此后, 光纤中非线性效应的研究受到了广泛关注^[1-5]。SRS^[6-7]和四波混频效应

(FWM)^[8-10]是石英单模光纤(SMF)中两种非常重要的三阶非线性效应。

SRS效应具有明显的能量动力学传递特征, 随着斯托克斯光级数的增加, 这种能量传递的能力会逐级递减, 低级的斯托克斯光能量应该大于高级的

收稿日期: 2017-12-05; 收到修改稿日期: 2017-12-15

基金项目: 国家 863 计划(2012AAXX090)

作者简介: 张鹏(1988—), 男, 博士研究生, 主要从事激光应用技术方面的研究。E-mail: zp@cust.edu.cn

导师简介: 田春林(1972—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事光机电一体化方面的研究。

E-mail: tcl@cust.edu.cn (通信联系人)

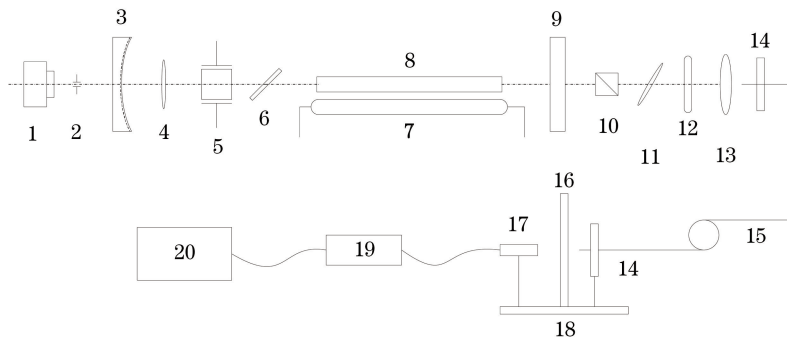
斯托克斯能量^[11]。在实验过程中,抽运光能量具有一定的波动性,SRS效应具有明显的阈值特性,由于受到FWM效应的影响,某一级的斯托克斯光能量会高于前一级的斯托克斯能量,甚至会出现高于抽运光能量的现象^[12]。

为此,本文对石英SMF中的SRS和FWM效应的相互影响及其光斑传输模式进行了实验研究。结果表明,SRS和FWM效应传输的光斑模式是不同的,SRS效应是以HE₁₁模式传播,FWM效应是以HE₁₂模式传播。实验发现,改变抽运光的峰值功率,受激光谱谱线失去明显的SRS谱线特征,随着抽运光峰值功率的逐渐增加,受激光谱谱线逐渐呈现出FWM效应的谱线特征,说明SRS效应受到

FWM影响比较严重,低阶谱线中相继出现了能量强度很高的附加峰,高阶谱线则发生了不同程度的光谱展宽效应,对应级数的斯托克斯光产生了较大的波长漂移。

2 实验装置

实验方案如图1所示。采用电光调Q脉冲Nd³⁺:YAG固体激光器作为抽运光源,输出中心波长为531.81 nm±0.2 nm,重复频率为1~20 Hz,脉冲宽度约为12 ns,最大峰值功率小于等于50 MW。利用偏振片控制输出单脉冲能量,利用Φ1.5 mm的小孔光阑选择近似为基模的抽运光输出模式,通过焦距为24 mm的聚焦透镜聚焦,耦合进入光纤的一端。



1: laser diode; 2: small aperture; 3: 1064 nm high reflection mirror; 4: 1/4 wave plate; 5: KDP crystal; 6: brewster plate; 7: pulse xenon lamp; 8: Nd³⁺:YAG crystal rod; 9: 1064 nm output mirror; 10: KTP (KTiOP₄) crystal; 11: narrow band filter; 12: polaroid; 13: focusing lens; 14: fiber flange plate; 15: single mode fiber; 16: light screen; 17: receiving fiber; 18: optical table; 19: spectrometer; 20: computer

图1 单模光纤SRS实验装置图

Fig. 1 Diagram of single mode fiber SRS experiment

实验所用的工作介质为YOFC公司生产的G.652D型石英SMF,光纤内芯层直径为8~10 μm,外包层直径为125 μm,截止波长为1310 nm,归一化频率可表示为

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a \sqrt{n_1^2 - n_2^2}, \quad (1)$$

式中: a 为光纤的纤芯半径; λ 为光纤的工作波长; n_1 为光纤纤芯的折射率; n_2 为光纤外包层的折射率。从(1)式可以看出,在光纤的纤芯半径不变时,光纤的归一化频率与波长成反比,在 $\lambda = 531.81$ nm处的归一化频率要大于 $\lambda = 1310$ nm处的归一化截止频率。根据光纤传输理论,只有当归一化频率小于归一化截止频率,才能实现单模传输。因此在实验过程中,光纤的输出模式并非是单模输出。光束输出端放置一个使用硫酸纸制作的简易光屏,使用光纤将光屏上的光斑传输进入Ocean Optics的USB2000+光纤光谱仪,采集受激非线性

光谱。

抽运光的峰值功率为220.6 kW,通过调节聚焦透镜、光纤法兰盘来调节耦合进入SMF的峰值功率,随着抽运光峰值功率的改变,观察并分别测量了实验过程中SRS和FWM效应的瞬时光谱以及光斑模式,能够明显地观察到光纤中的非线性效应从SRS向FWM演变的过程。

3 实验结果与分析

500 m的SMF的9阶SRS光谱及其光斑模式如图2所示。

从图2可以看出,在抽运条件稳定时,SMF中产生了较为明显的9级斯托克斯效应。1级斯托克斯光545.06 nm谱线的辐射能量低于抽运光531.81 nm谱线能量,符合SRS效应的能量传递规律,然而二级斯托克斯光556.16 nm谱线却出现了明显的能量激升现象,并且要高于抽运光531.81 nm

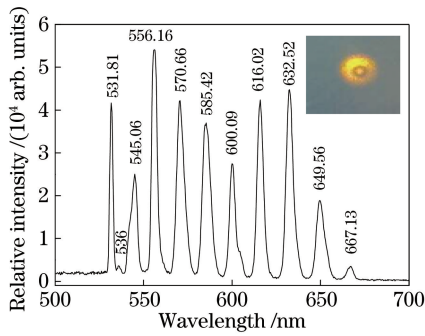


图2 500 m 单模光纤 9 阶 SRS 及其光斑模式
Fig. 2 Spectrum of 9 order SRS and its spot mode in 500 m SMF

和 1 级斯托克斯光 545.06 nm 谱线的能量。之后的 3 级斯托克斯光 570.66 nm、4 级斯托克斯光 585.42 nm 和 5 级斯托克斯光 600.09 nm 谱线的能量逐级降低,呈现出比较规律的能量动力学传递特征。随着 SRS 效应级数的继续增加,6 级斯托克斯光 616.02 nm 和 7 级斯托克斯光 632.52 nm 谱线出现了随着 SRS 效应级数的增加,斯托克斯光的能量升高的反常现象。8 级斯托克斯光 649.56 nm 和 9 级斯托克斯光 667.13 nm 谱线的能量依次降低,与 7 级斯托克斯 632.52 nm 谱线呈现出比较规则的能量动力学传递特征,与 SRS 效应的能量传递理论相符。

出现上述能量分布规律现象的主要原因有:

1) 因为 SRS 效应具有明显的阈值特性,各级斯托克斯光的 Raman 增益不同,不同的增益条件使能量的传递量不同;2) 由于 FWM 效应的存在,低级的斯托克斯光和相邻一级的斯托克斯光会发生相互耦合作用,产生符合能量递增的相位匹配条件,能量激增的斯托克斯光具有一定程度上的模式竞争优势,因此会发生某一斯托克斯光的能量突然激升的现象。基于上述原因,可以说明 2, 6, 7 级的斯托克斯光不仅 Raman 增益较大,而且明显受到了 FWM 效应的影响。

从图 2 还可以看出,SRS 效应的光斑能量分布整体近似高斯分布,中心能量高,边缘能量低,呈现环状分布,为典型的 HE_{11} 模式。同时,在抽运光 531.81 nm 和 1 级斯托克斯光 545.06 nm 谱线之间还能发现一个较为隐蔽的附加峰谱线 536 nm。从谱线位置上来看,536 nm 附加峰谱线距离抽运光 531.81 nm 谱线更近一些,但是 531.81 nm 谱线作为抽运光,具有良好的单色性,不可能出现其他波长的谱线,而且光谱仪分辨率为 ± 2.06 nm,小于抽运光波长与这个附加峰波长的差值,可以排除这个附

加峰是由实验测量工具误差产生的可能性。所以,根据非线性光学理论分析可知,出现这种情况可能有 3 种原因:1) 附加峰应属于 1 级斯托克斯光 545.06 nm 谱线,但是在能量传递过程中,这个传递时间在频谱范围内相对于 1 级斯托克斯光更贴近抽运光。2) SMF 中存在自发布里渊散射,自发布里渊散射光沿着抽运光的反方向传播,当抽运光达到一定程度时,反向传输的斯托克斯光和抽运光将发生相互干涉,形成较强的干涉条纹,使光纤局部折射率大大增加。这样基于电致伸缩效应,就会产生一个声波,声波的产生激发出更多的布里渊散射光,激发出来的散射光又加强声波,如此相互作用,产生很强的受激布里渊散射,从而形成了新的散射光。3) 从 SRS 光谱中可以看出,很多斯托克斯光的能量强度已经超过或是与抽运光耦合进入 SMF 中的能量持平,536 nm 附加峰很有可能是由抽运光、1 级、2 级甚至更高级的斯托克斯光相互耦合产生了更为复杂的非线性效应,进而激发出新的受激散射光。

500 m 石英 SMF 的 SRS 效应向 FWM 效应演化过程光谱及其光斑模式如图 3 所示。

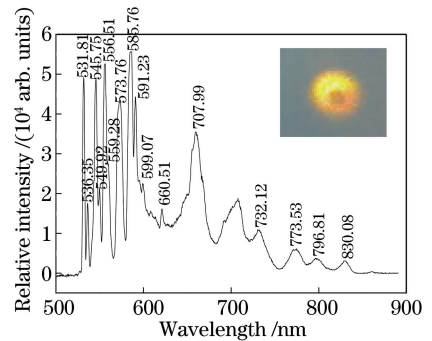


图3 500 m 单模光纤 SRS 效应向 FWM 效应演化过程光谱及其光斑模式

Fig. 3 Spectrum of evolution process from SRS to FWM and its spot mode in 500 m SMF fiber

从图 3 可以看出,前 4 级的斯托克斯光的能量随着斯托克斯级数的增加而增加,其中 3 级斯托克斯光 573.76 nm 谱线能量略有降低,但是整体趋势与 SRS 的能量传递规律不符。5 级斯托克斯光 660.51 nm 谱线后的其他高级斯托克斯光的能量逐渐降低。抽运光 531.81 nm 谱线附近依然出现了如图 2 中的 536.35 nm 的附加峰谱线。1 级斯托克斯光 545.75 nm 和 2 级斯托克斯光 556.51 nm 谱线分别产生了附加峰 549.92 nm 和 559.28 nm 谱线。而 4 级的斯托克斯光 585.76 nm 谱线不仅产生了附加峰 591.23 nm 谱线,而且作为 4 级斯托克斯光的附

加峰还产生了波长为 599.07 nm 的附加峰谱线,并且两个附加峰谱线的能量逐渐降低,4 级斯托克斯光的能量达到了所有斯托克斯光的最大值,出现了能量探测饱和的现象。3 级斯托克斯光 573.76 nm 谱线没有出现附加峰,很有可能是由于自身的能量过低所致。5 级斯托克斯光 660.51 nm 能量很低,但是和图 2 中的 5 级斯托克斯光 600.09 nm 相比,波长漂移达到 60.42 nm。7~12 级斯托克斯光出现了较为规律的 SRS 能量传递过程,但是波长漂移现象十分严重,而且和图 2 中的斯托克斯光相比,各级斯托克斯光谱线均出现了一定的展宽现象。从传输光斑的能量分布可以看出,光斑中心能量低、边缘能量高,为典型的 HE_{12} 模式。通过图 2 和图 3 的对比分析,发现随着抽运光峰值功率的改变,SMF 光纤中的 SRS 效应逐渐向 FWM 效应演化,并且受 FWM 效应的影响,低阶 SRS 效应的能量传递规律被破坏,多级斯托克斯光出现了附加峰谱线,高阶 SRS 效应的能量传递规律虽然呈现逐级降低的趋势,但是均出现一定程度的展宽,这种现象说明 FWM 效应对光谱展宽也有一定的促进作用。

4 结 论

研究了 531.81 nm 激光抽运 500 m 石英 SMF 的 SRS 和 FWM 效应的产生机制、影响及其光斑模式的特征。在抽运光输出峰值功率为 220.6 kW 时,SMF 光纤中能够产生明显的 9 阶 SRS 效应,并且最终以 HE_{11} 模式传输,受到 Raman 增益条件和 FWM 效应的影响,各级斯托克斯光的能量分布出现忽高忽低的现象。改变抽运光的峰值功率,SMF 中出现了较为明显的 FWM 效应,各级的斯托克斯效应受到 FWM 效应和非相位匹配 SRS 效应的影响,出现能量逐级递增的反常现象,并且低阶斯托克斯效应出现了明显的附加峰谱线,甚至附加峰谱线也出现了附加峰谱线,表明 SMF 中产生了较为明显的模式竞争和相位失配的现象。高阶斯托克斯效应又出现了不用程度的谱线展宽现象,FWM 效应光斑传输模式为 HE_{12} ,这种现象为可见光范围内的光谱展宽效应提供了一定的参考价值。

参 考 文 献

[1] Gu H M, Xing D, Xu J Q, *et al.* Experimental study on broadband SRS in fused silica fibers excited by single-frequency laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2002, 29(7): 609-612.

谷怀民,邢达,徐剑秋,等.单频激光抽运的石英光纤宽带受激拉曼散射实验研究[J].中国激光,2002,29(7):609-612.

- [2] Hu S L, Zhang C X, Gao C Q, *et al.* Stimulated Raman scattering and stimulated Brillouin scattering effects in ytterbium doped double clad fiber laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(1): 6-10.
胡姝玲,张春熹,高春清,等.包层抽运掺镱光纤激光器中受激拉曼散射和受激布里渊散射效应[J].中国激光,2008,35(1):6-10.
- [3] Yang H Y, Yang W, Jiang T, *et al.* Investigation on characteristics of simulated Raman threshold in a single mode fiber[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(1): 0129001.
杨洪远,杨巍,蒋婷,等.单模光纤中受激拉曼散射的阈值特性研究[J].光学学报,2014,34(1):0129001.
- [4] Long Q Y, Wu T W, Hu S M, *et al.* Threshold characteristics of forward-pumped fiber Raman amplifier[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(3): 030603.
龙青云,吴庭万,胡素梅,等.同向抽运光纤拉曼放大器的阈值特性[J].激光与光电子学进展,2014,51(3):030603.
- [5] Feng Y, Jiang H W, Zhang L. Advances in high power fiber laser technology[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(2): 0201005.
冯衍,姜华卫,张磊.高功率拉曼光纤激光器技术研究进展[J].中国激光,2017,44(2):0201005.
- [6] Tan Y. Research on nonlinear induced in optical fiber[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2013: 4-12.
谭勇.光纤中诱导非线性研究[D].长春:长春理工大学,2013:4-12.
- [7] Zhang Y J, Wang M, Wang Z F, *et al.* Fabrication of chirped and tilted fiber Bragg gratings and investigation of Raman filtering effect[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(1): 0106002.
张宇菁,王蒙,王泽锋,等.啁啾倾斜 Bragg 光纤光栅制作及 Raman 滤除研究[J].光学学报,2017,37(1):0106002.
- [8] Mao X R, Kou Z F, Zhang J H. Two improved methods of suppression four wave mixing effect in optical fiber transmission [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(8): 080601.
毛昕蓉,寇召飞,张建华.抑制光纤传输中四波混频效应的两种改进方法[J].激光与光电子学进展,2017,54(8):080601.

- [9] Liang J Q, Wang J F, Li P, *et al.* Optical sampling of chaotic laser based on four-wave mixing in highly nonlinear fiber[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(4): 0402009.
梁俊强, 王娟芬, 李璞, 等. 基于高非线性光纤中四波混频效应实现对混沌激光的采样[J]. 中国激光, 2013, 40(4): 0402009.
- [10] Liu L, Xu T F, Dai Z X, *et al.* Research progress on optical millimeter-wave generation based on four-wave mixing[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(5): 050001.
刘丽, 徐铁峰, 戴振祥, 等. 四波混频光生毫米波技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(5): 050001.
- [11] Zhang X H, Yao Z H, Li X Y, *et al.* Study of the spectral characters of stimulated Raman scattering in highly elliptical-core optical fibres[J]. Acta Physica Sinica, 2003, 52(4): 840-843.
张喜和, 姚治海, 李晓英, 等. 高保偏光纤前方受激拉曼散射光谱特性的研究[J]. 物理学报, 2003, 52(4): 840-843.
- [12] Tan Y, Huang Q S, Song X D, *et al.* Study of simulated Raman scattering and four wave mixing in an optical fiber combination[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(6): 1451-1455.
谭勇, 黄秋实, 宋雪迪, 等. 组合光纤中受激拉曼散射和四波混频研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(6): 1451-1455.