

石英系单模保偏光纤的受激拉曼散射 传输模式的实验分析

顾春明 林景全 郑学彦 王兆民

(长春光学精密机械学院光学物理系, 长春 130022)

摘 要 对石英系单模保偏光纤中的受激拉曼散射传输模式进行了实验研究, 测得三种不同截止频率的单模保偏光纤中受激拉曼散射光谱及其模式的分布, 其结果与圆芯多模渐变折射率光纤中的受激拉曼散射模式分布完全不同; 斯托克斯光谱的光斑尺寸基本不变; 而且具有以高阶模传输的特点。这些结果在国内外尚未见报道。

关键词 单模保偏光纤的受激拉曼散射, 传输模式。

1 引 言

在对多模渐变折射率光纤中的受激拉曼散射谱传输模式的研究中, 人们发现斯托克斯谱线光斑尺寸变小, 传输模式为单模, 并趋向于低阶模式传输^[1,2]。对此现象的解释大体上存在两种观点: 1) 自聚焦观点。认为由于强光作用使光纤中出现光学非线性效应, 从而产生附加折射率引起自聚焦效应使得光斑尺寸变小。2) 模式竞争理论。认为各模式的拉曼增益不同, 低阶模的增益大于高阶模的增益, 由于模式竞争, 最终以低阶模式传输^[3]。上述讨论仅是对渐变折射率光纤为拉曼增益介质作出的, 而对阶梯折射率光纤中受激拉曼散射传输模式的研究却更有意义。它可以检验渐变折射率光纤的自聚焦理论, 并对其结果进行验证与完善。本文对三种不同结构的单模保偏光纤进行了受激拉曼散射模式分布的观测, 给出了测试装置和实验结果, 发现其规律不同于目前国际上已报道的多模圆芯渐变折射率光纤中受激拉曼散射的传输模式。

2 实验装置及测试结果

测试单模保偏光纤受激拉曼光谱及传输模式的实验装置如图1所示。实验中所用三种光纤均为石英系椭圆芯单模保偏光纤*, 长短半轴分别为 $3.5\ \mu\text{m}$ 、 $2.5\ \mu\text{m}$ 、 $4\ \mu\text{m}$ 、 $5\ \mu\text{m}$ 和 $6\ \mu\text{m}$ 、 $7.5\ \mu\text{m}$, 截止波长分别为 $0.63\ \mu\text{m}$ 、 $0.85\ \mu\text{m}$ 和 $1.3\ \mu\text{m}$, 截止波长为 $0.63\ \mu\text{m}$ 的光纤长度约为 $10\ \text{m}$, $0.85\ \mu\text{m}$ 的光纤长度约 $52.5\ \text{m}$, $1.3\ \mu\text{m}$ 的光纤长度为 $9\ \text{m}$ 和 $63\ \text{m}$ 。泵浦光为调Q的YAG倍频激光器, 波长为 $0.532\ \mu\text{m}$, 脉冲宽度约为 $10\ \text{ns}$, 重复频率为 $4\ \text{Hz}$ 。光束经过10倍聚

收稿日期: 1995年4月3日

* 单模保偏光纤由北京玻璃研究所提供。

焦透镜耦合进入光纤,平均功率密度在 $10^{10} \text{ W/cm}^2 \sim 10^{12} \text{ W/cm}^2$ 范围内可调。输出光经分光板后,一部分由 300 l/mm 的光栅分光,用相机拍下各级传输模式和斯托克斯谱的照片。另一部分光经单色仪及检测系统记录给出所测的结果。

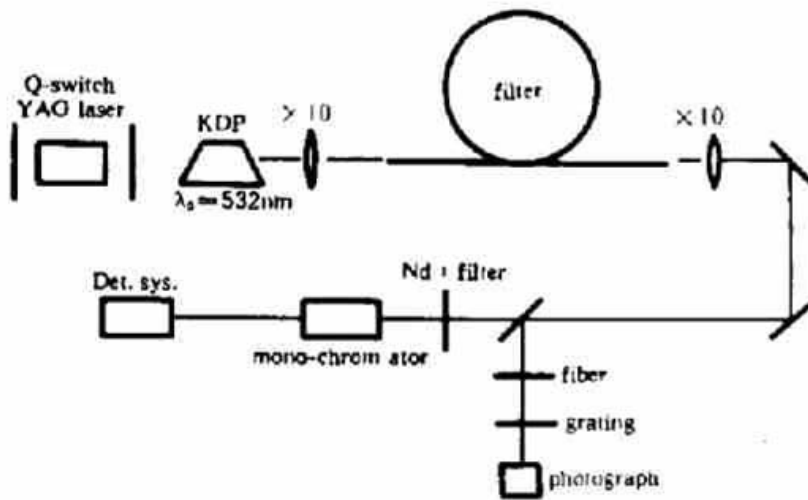


Fig. 1 Experimental setup

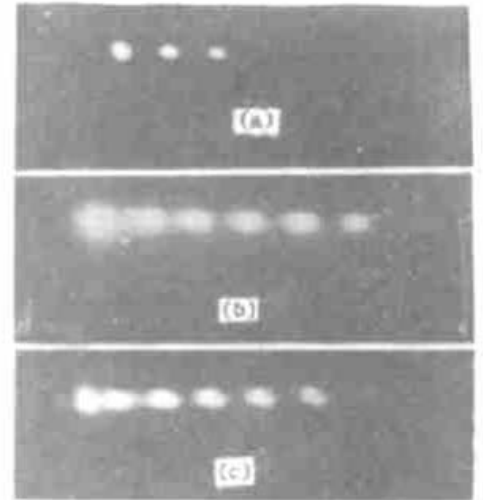


Fig. 2 The SRS spectrum photographs of three different fibers, (a) in $\lambda_c = 0.63 \mu\text{m}$, (b) in $\lambda_c = 0.85 \mu\text{m}$ and (c) in $\lambda_c = 1.3 \mu\text{m}$

图 2 为三种光纤受激拉曼散射光谱的照片,各级频移见表 1。它们分别大致对应于结晶态 SiO_2 的 $20.20 \mu\text{m}$ 、 $22.22 \mu\text{m}$ 和 $27.47 \mu\text{m}$ 的振动带^[4]。其偏差可能是由于光纤中 SiO_2 并非完全是以结晶态存在,而且由于芯径中渗入 GeO_2 ,影响了 SiO_2 的振动频率的缘故。

Table 1. Raman shifts of three optical fibers

λ_c (μm)	m	0	1	2	3	4	5	6
0.63	$\Delta \nu$ (cm^{-1})	0	478	933	1346	1777		
0.85		0	481	914	1395	1880	2370	
1.3		0	380	732	1146	1464	1900	2184

λ_c (μm)—cutoff wavelength, $\Delta \nu$ (cm^{-1})—Raman shift, m —order of SRS

图 2 的三幅照片中左边第一个光斑为泵浦光光斑,其余为受激拉曼的斯托克斯光光斑。将后者与前者进行比较,不难发现斯托克斯光光斑尺寸没有显著变小。这证明了由阶梯折射率光纤中的光学非线性效应产生的附加折射率的影响尚不足以产生自聚焦而使光斑变得那么小,因而一定存在一些其它制约受激拉曼散射模式分布的因素。

本文使用的泵浦光及观测到的各级斯托克斯谱线的波长都小于所用单模光纤的截止波长,这时的单模光纤应具有多模光纤的特性,允许有多个模式传输。但是,实验发现无论耦合条件(如角度、距离)如何改变,只要使泵浦功率密度超过光纤受激拉曼散射的阈值——即有稳定的受激拉曼光输出时,则受激拉曼散射光的传输模式便不受耦合条件的影响而固定为某一模式传输。这也证明了各模式间确实存在模式竞争。在光纤中允许传输的诸多模式中,只有最大拉曼增益或满足某些条件(如相位匹配条件)的模式才能形成稳定的输出模式。

图 3 为测得的三种光纤受激拉曼散射的斯托克斯谱的传输模式照片。图 3(a)为截止波长 $\lambda_c = 0.63 \mu\text{m}$ 光纤的受激拉曼散射传输模式照片,其各级斯托克斯谱的模式均相同,故这里只

给出其一,它是 LP_{11} 模。截止波长 $\lambda_c = 0.85 \mu\text{m}$ 光纤的受激拉曼散射传输模式照片与(a)相同,其各级也均为 LP_{11} 模。图 3 (b)为截止波长 $\lambda_c = 1.3 \mu\text{m}$ 光纤的受激拉曼散射的第三、四级斯托克斯谱线的模式照片,它们为 LP_{31} 模式。

表 2 列出按圆光纤近似,并忽略光纤的色散作用计算得出上述三种光纤对应于受激拉曼散射谱的归一化频率 V 及允许的传输模式。其中 $V = V_c \lambda / \lambda_c = 2.405 \lambda / \lambda_c$, λ_c 为光纤的相应截止波长, λ 为各级斯托克斯光的波长。

由表 2 可知,对于 $\lambda_c = 0.63 \mu\text{m}$ 光纤,本实验中所观测到的受激拉曼散射光中的最短波长 ($0.547 \mu\text{m}$) 和最长波长 ($0.590 \mu\text{m}$) 对应的 V 值均有 $2.405 < V < 3.832$, 这时光纤中可能传输的模式为 LP_{11} 和 LP_{01} 两个模式,但各级斯托克斯谱只以高阶的 LP_{11} 模传输。

Table 2. Normalized frequencies and possible transmission modes

λ_c (μm)	V	possible transmission modes
0.63	2.770~2.568	LP_{01}, LP_{11}
0.85	3.744~3.368	LP_{01}, LP_{11}
1.3	5.524~5.409	$LP_{01}, LP_{11}, LP_{21}, LP_{02}, LP_{31}, LP_{12}$

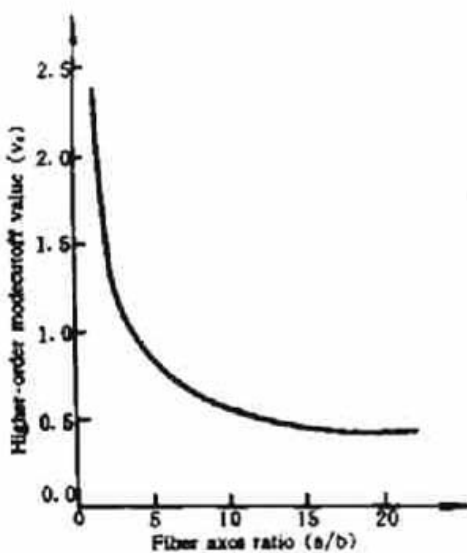


Fig. 4 Higher-order mode cutoff values for different ellipticities of step-index fiber

对于 $\lambda_c = 0.85 \mu\text{m}$ 的光纤,各级斯托克斯谱对应的 V 值范围为 $V = 3.744 \sim 3.368$, 有 $2.405 < V < 3.832$ 。尽管可以有 LP_{11} 和 LP_{01} 两个模式传输,但各级斯托克斯谱只以较高阶的 LP_{11} 模传输。由于上述实验中泵浦光波长接近光纤单模截止波长,用圆光纤近似椭圆光纤其结果与实验数据符合。

对于 $\lambda_c = 1.3 \mu\text{m}$ 光纤,第四级斯托克斯谱的归一化频率 $V = 5.409$, 有 $5.1356 < V < 5.5201$ 可能存在的模式为 $LP_{01}, LP_{11}, LP_{21}, LP_{02}$ 和 LP_{31} 五个模式,但第四级斯托克斯谱只以最高阶的 LP_{31} 模式传输。第三级斯托克斯谱的 V 值为 5.524, 有 $5.5201 < V < 6.3802$, 允许的模式为 $LP_{01}, LP_{11}, LP_{21}, LP_{02}, LP_{31}$ 和 LP_{12} , 按上述规律推论,三级斯托克斯谱的传输模式应为 LP_{12} 模,但实验测得却是 LP_{31} 模,这可能是由于圆光纤近似造成的偏差。因为椭圆芯光纤的各模式截止值均随长短半轴之比 a/b 的增大而变小,其 a/b 与 V_c 关系如图 4 所示^[5], 所以在这一点的椭圆芯光纤的归一化频率 V 应小于 LP_{31} 模的截止频率。

结论 上述实验结果表明,在阶梯折射率光纤中受激拉曼散射光是以单模传输,这一点与渐变折射率光纤的实验结果相同,所不同的是光斑尺寸基本不变,传输模式并不趋向于低阶模,而是以所允许的诸多模式中的最高阶模式传输。如果说这是由于模式竞争的结果,那么与

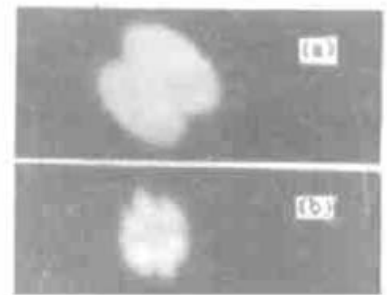


Fig. 3

Photographs of propagation mode (a) one of Stokes line mode photos in $\lambda_c = 0.63 \mu\text{m}$ and $\lambda_c = 0.85 \mu\text{m}$ fiber, others measured were same and they were LP_{11} mode, (b) the third and fourth Stokes line mode photo in $\lambda_c = 1.3 \mu\text{m}$ fiber, it was LP_{31} mode

渐变折射率光纤相反,在阶梯折射率光纤中高阶模的拉曼增益将大于低阶模的拉曼增益,因而在光纤中受激拉曼散射光的各传输模式之间一定存在某种因素,它应与光纤的折射率分布有关,制约、影响着各传输模式的拉曼增益。

参 考 文 献

- [1] P. L. Baldeck, Facciah, R. R. Alfano, Observation of self-focusing in optical fibers with picosecond pulses. *Opt. Lett.*, 1987, **12**(8): 588~589
- [2] Kin S. Chiang, Stimulated Raman scattering in a multimode optical fiber; evolution of modes in Stokes waves. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(5): 352~354
- [3] Kin S. Chiang, Stimulated Raman scattering in a multimode optical fiber; self-focusing or mode competition?. *Opt. Comm.*, 1993, **95**(4,5,6): 235~238
- [4] 工藤惠荣,基础物理图表,共立出版株式会社
- [5] Ashish M. Vengsarkar, Leonard G. Cohen, and W. L. Mammel, Theoretical analysis of highly elliptical-core optical fibers with arbitrary refractive-index profiles. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(23): 1658~1660

Experimental Study of SRS Propagation Mode in Single-Mode Polarization-Maintaining Optical Fibers

Gu Chunming Lin Jinqun Zheng Xueyan Wang Zhaomin

(Department of Optical Physics, Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Changchun 130022)

(Received 3 April 1995)

Abstract The SRS propagation modes in single-mode polarization-maintaining optical fibers were experimentally studied. The SRS spectrum and mode profile of three different cut-off wavelength fibers were obtained and the experimental results were completely different from those in circular-core graded-index optical fibers. The size of SRS beam remains nearly constant and they were characterized by the propagation with higher order mode. These results have not been seen both home and abroad.

Key words SRS in single-mode polarization-maintaining optical fibers, propagation mode.