

单模圆光纤中受激拉曼散射光谱偏振特性的研究*

孙秀平 冯克成 张喜和 李春明 谭勇 王兆民

(长春理工大学理学院, 长春 130022)

摘要 研究了单模圆石英光纤在不同偏振光泵浦条件下, 受激拉曼散射(SRS)各级斯托克斯光的拉曼阈值和频移特性, 同时测试了光纤输出端的泵浦光和斯托克斯光的偏振状态. 分析了偏振光在单模圆光纤中传输时偏振状态的变化.

关键词 非线性光学; 受激拉曼散射; 偏振; 斯托克斯光

中图分类号 O437.3 **文献标识码** A

0 引言

光纤中的受激拉曼散射是光纤最重要的非线性效应之一, 利用这种效应可进行一些新应用领域的研究, 研制出实用仪器, 如光纤拉曼激光器和放大器等, 可产生有使用价值的光谱线. 但目前研究主要集中在拉曼光谱的模式分布、光谱结构和各级斯托克斯(Stokes)光谱间能量传输机理等方面^[1~5]. 对于泵浦光的不同偏振状态对光纤拉曼散射各级 Stokes 线的影响、各级 Stokes 线自身的偏振特性等方面的研究却很少. 本文对单模圆芯石英光纤在不同偏振激励条件下受激拉曼散射光谱特性进行了实验研究.

1 实验装置

实验中所采用的光纤为单模石英圆芯光纤, 芯材为 SiO₂ + GeO₂, 芯径 10 μm, 相对折射率为 0.4%, 截止波长为 1.24 μm, 光纤长度 70 m, 缠绕在直径为 30 cm 的圆柱体上, 实验装置如图 1. 所用光源为调 Q 倍频 YAG 激光器, 波长为 532 nm, 脉宽为 10 ns, 重复频率为 5 Hz, 激光器输出的光通过波片由 10 倍物镜耦合聚焦进入光纤. 当加入 λ/2 波片时进入到光纤中的泵浦光为线偏振光, 当加入 λ/4 波片时进入到光纤中的泵浦光为圆偏振光, 且 λ/4 波片的光轴方向要与激光器输出偏振光的偏振方向成 45°角. 光纤出射光再由 10 倍显微物镜耦合

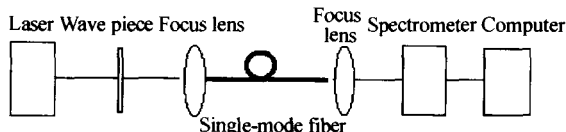


图 1 在不偏振状态激励下光纤受激拉曼散射实验装置图
Fig. 1 The experimental set of SRS under condition of different polarized state

进入测试系统, 测试系统由 CCD 光谱仪和数据采集卡构成, 实验数据由计算机进行处理.

2 实验结果与分析

2.1 拉曼光谱和不同偏振态泵浦条件下的拉曼阈值

图 2 是在入纤峰值功率为 70.5 kW 时, 线偏振光泵浦条件下获得的受激拉曼散射光谱图. 实验中可观察到 11 级 Stokes 谱线. 谱线的强度分布呈现出中间 Stokes 级强度最大, 而两边的低级和高级 Stokes 谱线的强度逐渐变小. 一级 Stokes 线出现双峰结构^[6]. 圆偏振光泵浦时的受激拉曼散射光谱和线偏振光泵浦时的光谱相类似.

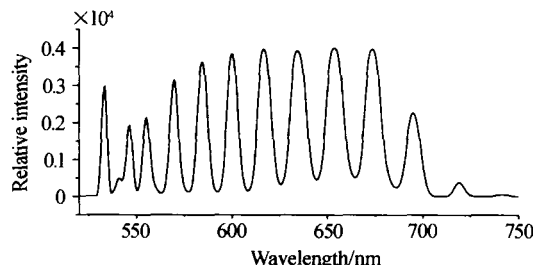


图 2 受激拉曼散射光谱图
Fig. 2 Spectrum of stimulated Raman scattering

实验中发现在圆偏和线偏两种偏振状态下, 出现同一级 Stokes 谱线时的拉曼阈值是不同的, 图 3 是 Stokes 谱线级数和拉曼阈值(这里用峰值功率表

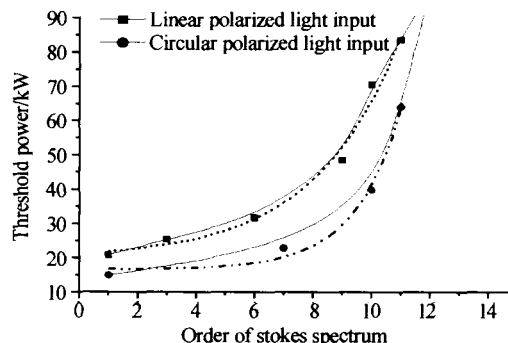


图 3 Stokes 光谱级数与拉曼阈值关系曲线
Fig. 3 The curve of Raman threshold value changed with the order of Stokes spectrum

* 吉林省教育厅科研基金资助课题(KB200122)

Tel: 0431-5373045 Email: sxiup@sina.com

收稿日期: 2005-01-26

示)间关系曲线. 由曲线可知圆偏振光泵浦时各级 Stokes 谱的阈值低于线偏振光泵浦时的各级 Stokes 阈值, 但两种偏振态曲线的形状基本相同, 可用相同的拟合函数表示

$$y = y_0 + Ae^{(x/t)} \quad (1)$$

式中 x 为 Stokes 谱线级数, y 为拉曼谱阈值. A 、 y_0 和 t 为常数. 对圆偏振泵浦光 $y_0 = 16.53505$, $A = 0.04177$, $t = 1.56625$; 对线偏振泵浦光 $y_0 = 20.8$, $A = 2.01069$, $t = 3.24561$. 图 3 中的虚线为拟合曲线.

2.2 不同偏振态泵浦条件下的拉曼频移

在线偏振光和圆偏振光泵浦下, 各级 Stokes 谱线的拉曼频移有所差异, 图 4 是拉曼频移与 Stokes 谱线级数关系曲线, 可见 Stokes 级数与频移是呈线性关系的, 也就是说各级拉曼谱的拉曼频移无论是线偏光泵浦还是圆偏光泵浦都是较好的等间隔分布的, 线偏光泵浦时相邻两级 Stokes 线的平均拉曼频移为 454.4 cm^{-1} , 圆偏光泵浦时为 446.4 cm^{-1} , 两者平均频移相差 8 cm^{-1} .

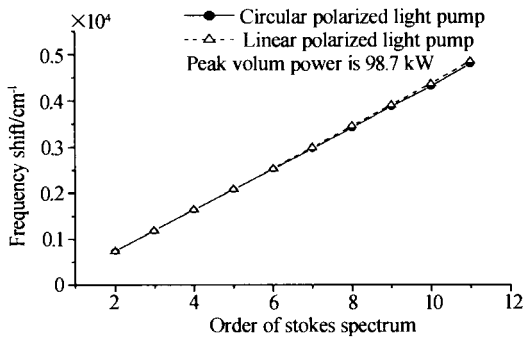


图 4 Stokes 级数与拉曼频移关系曲线
Fig. 4 The curve of Raman frequency changed with the order of Stokes spectrum

2.3 圆偏和线偏泵浦时 SRS 光谱的偏振状态

为了测试从光纤中出射的泵浦光和 Stokes 光的偏振状态, 在图 1 的实验装置 4 和 5 之间加一个偏振片, 偏振片的偏振化方向可以从 0° 至 360° 连续可调, 每隔 30° 位置 CCD 光谱仪采集一次光谱数据. 通过从光纤中出射的光在各偏振方向上的强度分布情况, 来考察其偏振态. 图 5 是圆偏光入纤时各级 Stokes 光在各偏振方向上的光强分布图, 图 6 和图 7 分别是通过调节起偏器在 90° 和 0° 方向上偏振的线偏振光入纤时各级 Stokes 光在各偏振方向上的光强分布图.

由图 5、6、7 可以看出: 线偏光入纤时, 光纤出射的 SRS 谱和泵浦光在各方向上强度不同, 通过用 $1/4$ 波片检验, 得出出纤光为部分偏振光. 入纤线偏光为 0° 和 90° 偏振方向时出纤光偏振情况大体相同, 即均在出纤 60° 偏振方向上能量分布达到最大,

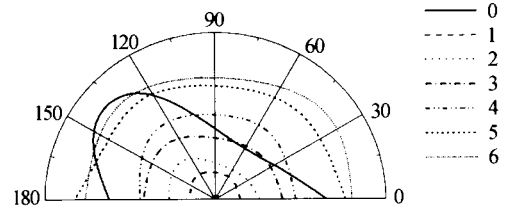


图 5 圆偏光泵浦时各级 Stokes 光在各偏振方向上的光强分布

Fig. 5 The intensity of Stokes in different polarized direction when circular polarized light pumps

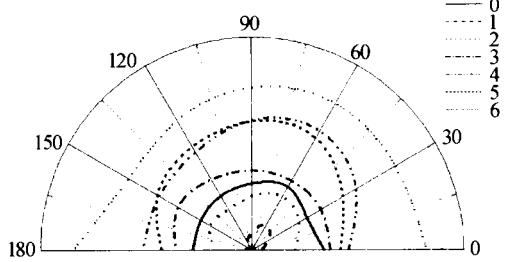


图 6 线偏光 (90°) 泵浦时各级 Stokes 光在各偏振方向上的光强分布

Fig. 6 The intensity of Stokes in different polarized direction when linear polarized (90°) light pumps

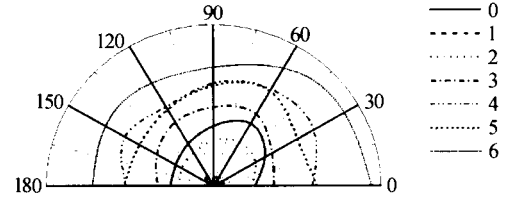


图 7 线偏光 (0°) 泵浦时各级 Stokes 光在各偏振方向上的光强分布

Fig. 7 The intensity of Stokes in different polarized direction when linear polarized (0°) light pumps

在 150° 偏振方向上能量分布最小, 这说明各级 Stokes 光的偏振态与入纤线偏光的偏振方向无关. 出纤泵浦光偏振情况基本与各级 Stokes 谱线的偏振情况相同, 在 75° 左右偏振方向上能量分布最大, 而在 150° 左右偏振方向上能量分布最小. 圆偏光入纤时, 各级出纤 Stokes 谱线的各偏振方向能量分布近似相同, 通过用 $1/4$ 波片检验后, 得出出纤光为非偏振光. 出纤泵浦光为部分偏振光, 在 140° 左右偏振方向上能量分布最大, 而在 60° 左右偏振方向上能量分布最小.

考虑一根实际的光纤, 其介电系数可以写成

$$\epsilon(x, y, z) = \epsilon(x, y) + \Delta\epsilon(x, y, z) \quad (2)$$

式中, $\epsilon(x, y)$ 表示理想圆单模光纤的介电性质; $\Delta\epsilon(x, y, z)$ 反映光纤截面椭圆畸变、弯曲等内部残余应力以及外界电场、磁场等各种微扰因素的影响, 一般情况下 $\Delta\epsilon(x, y, z)$ 远小于 $\epsilon(x, y)$, 可用微扰理论分析光纤中的偏振现象^[7]. 微扰中的光场可以写成理想圆单模光纤中两个本征线偏振模的叠加

$$E = \sum_i A_i(z) E_i(x, y) e^{-i\beta z} \quad (3)$$

式中 $A_i(z)$ 为相应的模场系数, 在理想圆单模光纤

中它为常数,在有微扰的情况下 $A_1(z)$ 为 z 的函数,对于两个同向模的耦合,根据耦合模的理论,应满足以下的耦合方程

$$\frac{dA_1}{dz} = -ik_{11}A_1 - ik_{12}A_2 \quad (4)$$

$$\frac{dA_2}{dz} = -ik_{21}A_1 - ik_{22}A_2 \quad (5)$$

式中 $k_{uv} = \frac{\omega}{4} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E_u^* (\Delta\epsilon E_v) dx dy$ 为耦合系数,由以上两式可以看出,对角元 k_{11} 和 k_{22} 使两个简并模式的传播常数 β 产生一个增量 $\Delta\beta$, 并且有 $\Delta\beta = k_{11} - k_{22}$ 非对角元素 k_{12} 和 k_{21} 导致了两模式间的功率耦合,使得在光纤中传输的光偏振态发生变化.

3 结论

在不同偏振态的泵浦条件下,单模圆石英光纤同一级 Stokes 谱线的拉曼阈值是不同的,但 Stokes 谱的级次和拉曼阈值的关系具有相同的规律性. 在两种偏振态的泵浦条件下,各级 Stokes 谱线的频移略有差别. 具有确定偏振态的泵浦光进入圆光纤后,出射光没有确定的偏振态.

参考文献

1 张喜和,姚志海,李晓英,等. 高保偏双折射光纤前方拉曼

散射的研究. 物理学报,2003,52(4):2193~2196

Zhang X H, Yao Z H, Li X Y, et al. *Acta Physica Sinica*, 2003, 52(4):2193~2196

2 Chiang K S. Stimulated Raman scattering in a multimode optical fiber; evolution of mode in Stokes wave. *Opt Lett*, 1992, 5(17):352~354

3 高致慧. 单模光纤系统激光传输特性的研究. 光子学报, 2000, 29(7):599~602

Gao Z H. *Acta Photonica Sinica*, 2000, 29(5):599~602

4 Xin X J, Yu Z X, Ren J H, et al. Analysis of the threshold of Raman fiber amplifiers. *Acta Photonica Sinica*, 2002, 31(8):1004~1006

5 游善红,郝素君,殷宗敏,等. 单模光纤中弯曲损耗的测试分析. 光子学报,2003,32(4):409~412

You S H, Hao S J, Yin Z M, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(4):409~412

6 苏红新,阮双琛,吕可诚,等. 单模石英光纤中连续波泵浦 SRS 谱的演化. 光子学报,2003,32(3):272~275

Su H X, Ruan S C, Lü K C, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(3):272~275

7 Govind P. Agrawal, Nonlinear fiber optics & application of nonlinear fiber optics, Third edition, Beijing, Publishing House of Electronics Industry, 1992. 129~144

Study of Polarized Characters of Stimulated Raman Scattering Spectrum in Single Mode Circular Fiber

Sun Xiuping, Feng Kecheng, Zhang Xinghe, Li Chunming, Tan Yong, Wang Zaoming

Changchun university of science and technology, Changchun 130022

Received date: 2005-01-26

Abstract The Raman threshold, frequency-shift and the states of Stokes spectrum of stimulated Raman scattering under the condition of different polarized pump light in single mode circle core optical fiber were studied. The polarization of pump and Stokes spectrum at output terminal of fiber were measured. The change of the polarized light transmitted in single mode circle core optical fiber was analysed.

Keywords Fiber; Stimulated Raman scattering; Polarization; Stokes spectrum



Sun Xiuping was born in 1965. She graduated in Physics Department of Jilin University in 1988 and received B. S. degree in 2002. She is an associate professor. Now she is a candidate of Ph. D. degree in Changchun University of Science and Technology. Her research interest is nonlinear optics.