

单模石英光纤中受激喇曼散射的研究*

杜戈果¹ 阮双琛¹ 苏红新² 邓莹¹ 陈慧玲¹

(1 深圳大学工程技术学院, 深圳市激光工程重点实验室, 深圳 518060)

(2 河北大学物理学院, 保定 071002)

摘要 利用连续光纤激光器为泵浦源, 对单模石英光纤中的受激喇曼散射进行了实验研究. 在较低功率泵浦下, 观察到由自发喇曼散射向受激喇曼散射演化的过程中, 光谱不断变窄; 当 Stokes 波信号功率较强时, 观察到光谱峰值相对于泵浦波的频移量从 440 cm^{-1} 转化到 490 cm^{-1} . 在改进耦合系统后, 不仅观察到一级喇曼频移, 并且观察到了高阶 Stokes 光. 在产生多级喇曼光谱时能量移动比较复杂, 每两级的喇曼频移间隔并不完全相同.

关键词 受激喇曼散射; 单模石英光纤; 能量红移; 多级 Stokes 光; 喇曼频移

中图分类号 O437 **文献标识码** A

0 引言

受激喇曼散射 (Stimulated Raman Scattering, 通常简称 SRS) 是光纤非线性光学中一个很重要的非线性过程, 对它的研究, 不仅可以丰富人们对光的传播及其与物质相互作用方式的理解和认识, 而且也提供一种用来探索物质的组成、结构、均匀性和物态变化的特殊光学手段. 尤其近年来, 随着社会信息传输量的急剧增加, 人们对喇曼光纤放大器的研究越来越重视, 因为它可放大掺铒光纤放大器所不能放大的波段. 而这种在目前光纤通信领域具有重要应用价值的光纤喇曼放大器就是基于光纤中的 SRS 效应^[1-3]. 喇曼放大器通常工作在连续泵浦状态下, 因此研究连续波泵浦下的 SRS 效应是很有意义的. 本文以连续光纤激光器为泵浦源, 研究了一级 Stokes 光谱以及高阶 Stokes 光谱的形成.

1 受激喇曼散射原理

当用一束频率为 ω_p 的光波照射共振频率为 ω_v 的散射介质时, 在散射的辐射中会存在产生了频移的成分 ω_s ($\omega_s = \omega_p - \omega_v$), 这种散射叫做喇曼散射, 这就是普通的喇曼散射, ω_s 称为 Stokes 光子. 当用强激光照射散射介质时, 相干的入射光子主要不是被热振动声子所散射, 而是被受激声子所散射. 所谓受激声子, 是由一个入射光子与热声子相碰撞结果产生一个 Stokes 光子并增添一个声子, 这个增添的声子称为受激声子. 当入射光子再与这个增添的受激声子相碰撞时, 在再产生一个 Stokes 光子的同

时, 又增添一个受激声子. 如此继续下去, 便形成一个产生受激声子的雪崩过程. 由于受激声子所形成的声波是相干的, 而且入射激光也是相干的. 所以, 由受激散射所产生的 Stokes 光也是相干的, 即所谓的受激喇曼散射. 量子力学描述为入射光波的一个光子被一个分子散射成为另一个低频光子, 同时分子完成振动态之间的迁跃. 入射光作为泵浦光产生 Stokes 的频移光.

在早期单模光纤的 SRS 实验测得了石英光纤中的喇曼增益系数 g_R ^[4]. 石英光纤中喇曼增益的最显著的特征是 g_R 有一个很宽的频率范围可达 40 THz, 并且在 13 THz 附近有一个较宽的主峰, 这些性质是由于石英玻璃的非晶特性所致. 在熔石英等非晶材料中, 分子的振动频率展宽成为频带, 这些频带交迭并产生连续态. 与大多数介质中在特定频率上产生喇曼增益情况相反, 石英光纤中的喇曼增益可以在一个很宽的范围内连续地产生, 从这一特性看, 光纤可用做宽带放大器. 因此, 只要泵浦波与信号波之间的频差位于喇曼增益谱的带宽内, 信号波就会由于喇曼增益而被放大; 如果仅仅只有泵浦波输入, 那么自发喇曼散射产生的信号将作为信号波在传输过程中被放大. 这是由于自发喇曼散射在整个喇曼增益谱宽内产生光子, 其所有频率分量都被放大, 其中对应增益最大的频率分量建立得最快. 对于纯石英光纤, g_R 最大值所对应的频率是泵浦频率下移 13.2 THz, 其喇曼频移为 440 cm^{-1} ; 当泵浦功率超过某一阈值时, 此频率分量近似指数增长, 最终产生一个与泵浦光波具有固定频率下移量的 Stokes 波. 如果泵浦光功率足够强, 那么生成的 Stokes 光又将激起第二级、乃至更高级次的 Stokes 光, 形成级联受激喇曼散射. 通过相互级联的多次喇曼频移, 就能够将泵浦光能量转化到所需要的波长.

*广东省自然科学基金资助项目(011736)、深圳市南山区科学技术局资助项目

Tel: 0755-26534535 Email: degeguo@szu.edu.cn

收稿日期: 2003-07-14

2 实验与结果分析

实验装置如图 1 所示. 泵浦源为一台最大连续输出功率为 5.5 W 的光纤激光器, 输出波长为 1064 nm, 线宽 0.9 nm, 输出为接近衍射极限的单横模光束, M^2 因子为 1.1, 并且已经过了光学元件准直. 采用美国康宁公司研制的 Corning 的 SMF-28™ 标准单模光纤作为增益光纤, 光纤长度约为 25 km.

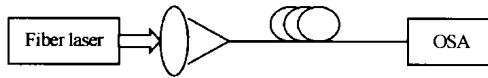


图 1 实验装置示意图
Fig. 1 The schematic diagram of experiment setup

2.1 实验一

在最初的实验中, 采用了 10 × 的物镜镜头进行聚焦, 将泵浦光耦合到光纤中, 其透过率为 72%. 由于各种损耗因素, 实验测得最大入纤功率只有 1.8 W. 在石英光纤的另一端, 利用光谱仪对输出光谱进行测量.

在泵浦功率小于 3.8 W 时, 在输出光谱中只观察到剩余的泵浦光. 当泵浦功率达到 3.8 W 时, 在光谱中泵浦光的长波方向出现了一个新的谱峰, 其峰值波长位于 1117 nm, 如图 2 所示. 计算发现, 新的谱峰相对于泵浦光的波长移动为 53 nm, 波数差为 440 cm^{-1} ,

正好与石英光纤的典型喇曼频移 (13.2 THz) 相对应, 说明新出现的光波正是第一级 Stokes 光. 光谱同时显示, Stokes 波的线宽远大于泵浦光的线宽.

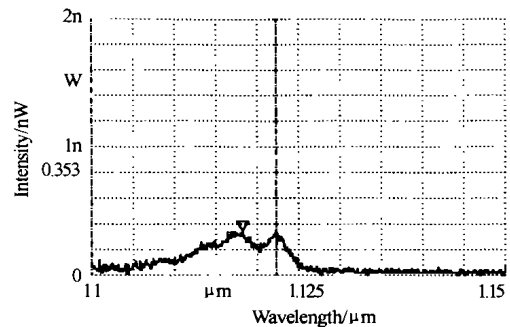


图 2 泵浦功率为 3.8 W 时测得的光谱
Fig. 2 Measured spectrum with an input power of 3.8 W

图 3 显示了不同泵浦功率下第一级 Stokes 波光谱细节的演化过程. 可以看到, 图中 Stokes 波由两个主光峰构成, 其峰值对应的波长分别为 1117 nm 和 1123 nm, 计算表明它们相对于泵浦光的频移分别为 440 cm^{-1} 和 490 cm^{-1} . 随着泵浦功率的增加, 440 cm^{-1} 和 490 cm^{-1} 这两个谱峰的光谱强度同时增大, 但前者的增长速度明显超过后者, 这是由于喇曼增益谱中 440 cm^{-1} 对应的峰值稍大于 490 cm^{-1} 对应的峰值. 比较发现, 此光谱图与喇曼增益谱十分相似.

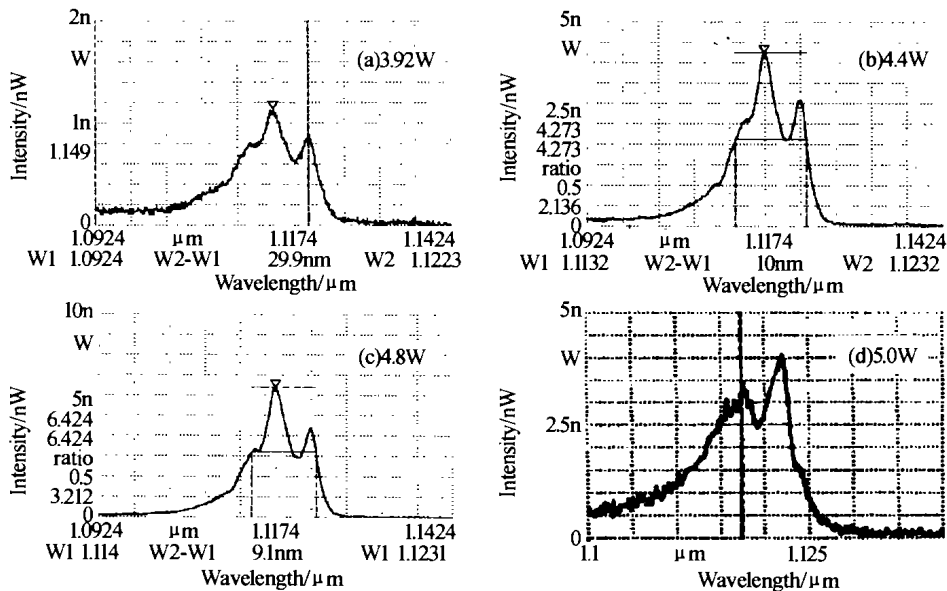


图 3 不同泵浦功率下测得的第一级 Stokes 光谱
Fig. 3 The first-order stokes spectra with different pump power

另外, 从图中也看到, 随着泵浦功率的增加, Stokes 波的光谱强度整体上升, 但其光谱宽度却相应减小. 说明在自发喇曼散射向受激喇曼散射演化的过程中光谱宽度不断窄化. 当信号功率较小时 Stokes 波的峰值频移为 440 cm^{-1} , 与喇曼增益谱中最高主峰相对应; 而当信号功率较高时, Stokes 波的峰值频移将“红移”到 490 cm^{-1} (见图 3(d)), 与喇曼增益曲线的第二个主峰相对应. 对图 3 中一级 Stokes

波演化过程的分析, 详见前期文章^[5]. 在光纤初始阶段, 泵浦具有较高的能量, 可以使 I_1 (440 cm^{-1}) 和 I_2 (490 cm^{-1}) 峰均得到增益, 一旦泵浦光耗尽, I_1 就无法得到能量, 而 I_2 却可以吸收 I_1 的能量, 继续增强, 发生能量红移.

2.2 实验二

为了提高入纤功率, 换用一特殊设计的透镜组作为耦合元件, 焦距较 10 × 物镜稍长一些. 透过率

提高到 90%, 实验测得耦合效率接近 50%.

在泵浦功率达 3.5 W 时, 观察到一级 Stokes 波, 如图 4 所示, 最大频移仍为 440 cm^{-1} . 随着泵浦功率的增加, 一级 Stokes 波出现在相应频移为 490 cm^{-1} 处, 并且观察到高阶 Stokes 波. 因为泵浦功率比较大, 不仅在一级 Stokes 波中出现前面所谈

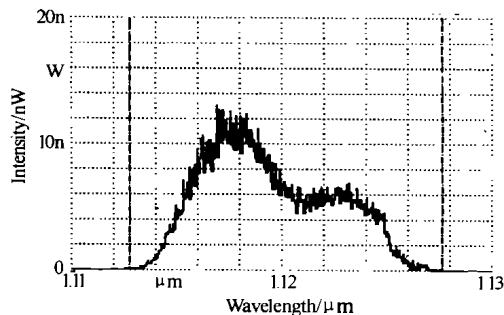


图 4 新的实验条件下的 Stokes 光谱图
Fig. 4 Stokes spectrum at different experiment condition

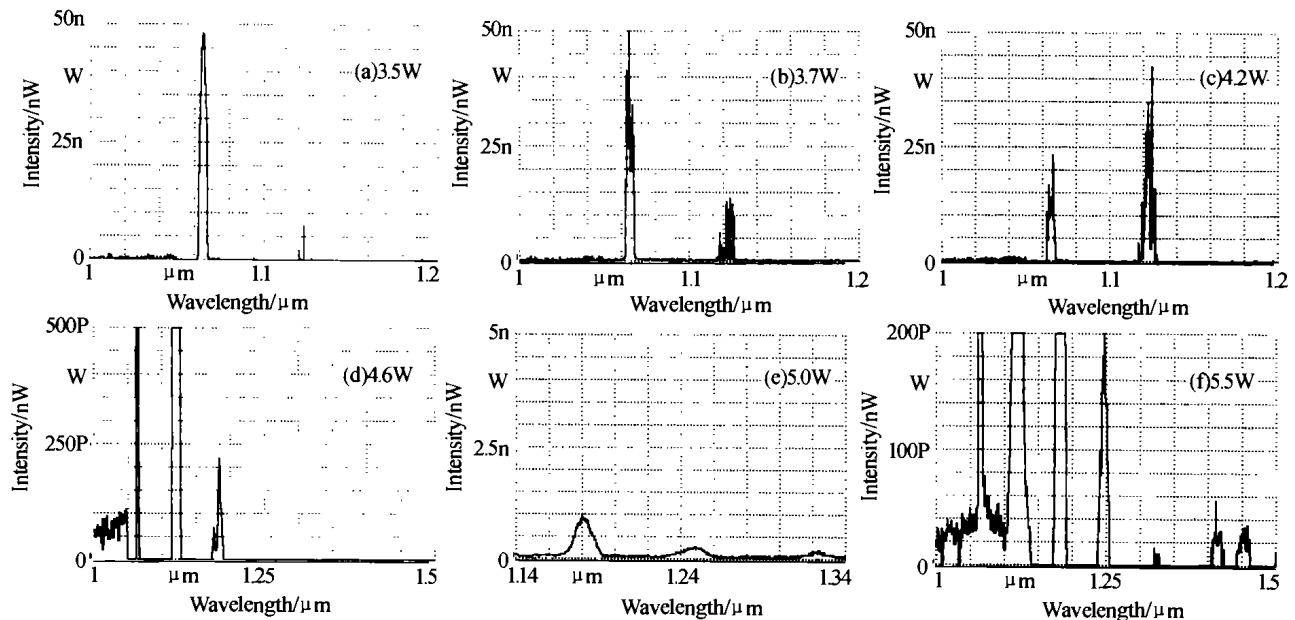


图 5 一级 Stokes 波向多级 Stokes 波演化过程
Fig. 5 Development process of the first-order Stokes to higher-order Stokes

到的能量移动, 而且一级 Stokes 波作为泵浦光, 产生二级甚至更高级 Stokes 波.

泵浦光中心波长 λ_0 为 $1.0644\text{ }\mu\text{m}$, 对纯石英光纤, 喇曼增益 g_R 的最大值所对应的频率是由泵浦频率下移 440 cm^{-1} , 按照 440 cm^{-1} 频移推算五级 Stokes 波长分别为 $1.1167\text{ }\mu\text{m}$, $1.1744\text{ }\mu\text{m}$, $1.2384\text{ }\mu\text{m}$, $1.3098\text{ }\mu\text{m}$, $1.3899\text{ }\mu\text{m}$, 但由于喇曼光谱内部出现“能量红移”, 而由实验得到的四级 Stokes 波长分别在 $1.123\text{ }\mu\text{m}$, $1.185\text{ }\mu\text{m}$, $1.245\text{ }\mu\text{m}$, $1.324\text{ }\mu\text{m}$, 可以推算出一级喇曼频移 X_1 为 490 cm^{-1} , 二级喇曼频移 X_2 为 $2 \times 490\text{ cm}^{-1}$, 三级喇曼频移 X_3 为 $(490 + 2 \times 440)\text{ cm}^{-1}$, 四级喇曼频移 X_4 为 $(490 + 3 \times 440)\text{ cm}^{-1}$. [由波数定义 $\tilde{\nu} = \frac{E_1 - E_2}{hc}$ 可得计算频移公式为: $\frac{10^4}{\lambda_0^{-1} \times 10^4 - nX} = \lambda_n$, 其中, λ_0 为泵浦光中心波长(单位取 μm), n 为 Stokes

到的能量移动, 而且一级 Stokes 波作为泵浦光, 产生二级甚至更高级 Stokes 波.

从图 5 中看到 Stokes 波的演化过程, (a) 是入纤功率刚刚达到阈值时的一级 Stokes 波; (b)、(c) 随泵浦功率增加, 泵浦波有一部分能量转换给一级 Stokes 波, 泵浦光强度开始减弱, 一级 Stokes 波逐渐增强; (d) 泵浦功率继续增加, 一级 Stokes 光谱峰的强度逐渐出现饱和, 同时, 激发出二级 Stokes 波; (e)、(f) 当泵浦功率达到甚至超过 5 W, 出现多级喇曼散射. 可以看到一级 Stokes 波和二级 Stokes 波出现“饱和”(光谱仪的饱和, 在线性坐标下只有强度较大的信号出现饱和, 才能观察到小信号的光谱), 还出现了三级、四级 Stokes 波. 四级喇曼散射波波长分别在 $1.123\text{ }\mu\text{m}$, $1.185\text{ }\mu\text{m}$, $1.245\text{ }\mu\text{m}$, $1.324\text{ }\mu\text{m}$ 处. 在不同的泵浦功率下, 所激发的 Stokes 光级数不同. 入纤功率越大, 激发的 Stokes 光级数越高.

波的级数, λ_n 为第 n 级的 Stokes 波的波长, X 为喇曼频移量(单位为 cm^{-1}). 从推算结果可以看到, 在产生多级喇曼光谱时能量移动比较复杂, 每两级的喇曼频移间隔并不完全相同. 在低级 Stokes 谱中, 因泵浦功率较大, 喇曼频移量可达 490 cm^{-1} ; 而高级 Stokes 谱中, 泵浦功率已不足以支持 440 cm^{-1} 向 490 cm^{-1} 之间的能量红移, 喇曼频移量为 440 cm^{-1} .

3 结论

利用光纤激光器为泵浦源研究了单模石英光纤中的连续波喇曼散射谱的变化规律. 在由自发喇曼散射向受激喇曼散射演化的过程中光谱宽度不断窄化, 并在第一级喇曼光谱中观察到了 440 cm^{-1} 向

490 cm^{-1} 之间的谱峰移动的现象,而在形成多级 Stokes 波谱中,喇曼频移量并不固定,在低级 Stokes 波谱时支持 490 cm^{-1} 的频移,而在高级 Stokes 波谱时支持 440 cm^{-1} 的频移,取决于泵浦情况.

参考文献

- 1 Emori Y, Tannaka K, Namiki S, *et al.* 100 nm bandwidth flat-gain Raman amplifiers pumped and gain-equalized by 12-wavelength-channel WDM laser diode unit. *Electron Lett*, 1999, **35**(6): 1355 ~ 1356
- 2 Xin X J, Yu C X, Zhang R, *et al.* The influence of configuration of Raman fiber amplifier on performance. *Acta Photonics Sinica* 2003, **32**(2): 140 ~ 143
- 3 王涛,姚建铨,李喜福,等. 光纤喇曼放大泵浦光与信号光的关联研究. 光子学报, 2003, **32**(11): 1321 ~ 1324
Wang T, Yao J Q, Li X F, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(11): 1321 ~ 1324
- 4 Stolen R H, Ippen E P. Raman gain in glass optical waveguides. *Appl Phys Lett*, 1973, **22**(6): 276 ~ 278
- 5 苏红新,阮双琛,杜戈果,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, Du G G, *et al.* *Acta Photonics Sinica*, 2003, **32**(3): 272 ~ 275

Studies on SRS Spectra in Single-mode Silica Fiber

Du Geguo¹, Ruan Shuangchen¹, Su Hongxin², Deng Ying¹, Chen Huiling¹

¹ College of Engineering and Technology, Shenzhen University, Shenzhen Key Laboratory of Laser Engineering, Shenzhen 518060

² Institute of Physics Department of Nankai University, Tianjing 300071

Received date: 2002-07-14

Abstract In this paper, formation process of SRS (Stimulated Raman Scattering) spectra is studied schematically in single-mode silica fiber pumped by a CW fiber laser. For the first-order Stokes spectrum, the spectrum width narrows gradually as the spectrum builds up from spontaneous Raman scattering to SRS and energy red-shift from 440 cm^{-1} to 490 cm^{-1} within the Stokes spectrum happened between the peak of the Stokes and the pump laser. For higher-order Stokes, Raman frequency shift between each order is not fixed, energy shift of 440 cm^{-1} and 490 cm^{-1} can coexist depending on pump condition.

Keywords SRS; Single-mode silica fiber; Energy red-shift; Higher-order Stokes; Raman frequency shift



Du Geguo was born in 1971, in Shaanxi Province. She earned a B. Eng. degree in Photoelectron Technology from Electron Engineering Department, Tsinghua University in 1993 and a Ph. D. degree in Optics at Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Academia Sinica in 1999. Now she works in Shenzhen University as an associate professor. Her research involves rare earths-doped fiber laser, fiber amplifiers, active components for optical communication and LD pumped solid state lasers.