

文章编号: 0258-7025(2002)07-0609-04

# 单频激光抽运的石英光纤宽带受激拉曼 散射实验研究

谷怀民<sup>1</sup>, 邢 达<sup>1</sup>, 徐剑秋<sup>2</sup>, Ken-ichi Ueda<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 华南师范大学激光生命科学研究所, 广州 510631  
<sup>2</sup> Institute of Laser Science, University of Electro-Communications, Tokyo, 182-8585, Japan)

**提要** 采用单频高功率 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光的倍频光(532 nm)作为抽运源, 激发长度为 250 m 和 920 m 的单模石英光纤, 开展了石英光纤在可见光谱范围内的受激拉曼散射实验研究, 获得了宽带宽的、第 1 级到第 4 级受激拉曼散射 Stokes 光谱, 拉曼频移峰值分别为 450 cm<sup>-1</sup>, 1064 cm<sup>-1</sup>, 1610 cm<sup>-1</sup> 和 2168 cm<sup>-1</sup>。

**关键词** 光纤, 受激拉曼散射, 宽带 Stokes 光谱, 拉曼光纤激光器

中图分类号 O 437.3 文献标识码 A

## Experimental Study on Broadband SRS in Fused Silica Fibers Excited by Single-frequency Laser

GU Huai-min<sup>1</sup>, XING Da<sup>1</sup>, XU Jian-qiu<sup>2</sup>, Ken-ichi Ueda<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Institute of Laser Life Science, South China Normal University, Guangzhou 510631  
<sup>2</sup> Institute of Laser Science, University of Electro-Communications, Tokyo, 182-8585, Japan)

**Abstract** The frequency doubled output of a single-frequency Nd:YVO<sub>4</sub> laser centered at  $\lambda_0 = 532$  nm was used as input pump to excite single-mode fused silica fibers with length of 250 m and 920 m, respectively. The study on broadband SRS Stokes spectrum within range of visible spectrum in fused silica fibers was made. The first order to the fourth order SRS Stokes spectra were obtained, and frequency shift peak was at 450 cm<sup>-1</sup>, 1064 cm<sup>-1</sup>, 1610 cm<sup>-1</sup> and 2168 cm<sup>-1</sup>, respectively.

**Key words** fiber, broadband stimulated Raman scattering(SRS), Stokes spectrum, Raman fiber laser

### 1 引 言

光纤激光器与光纤兼容性好,能工作于红外和近红外波段,在光纤通信和光纤传感器等领域具有广泛的应用前景,自从 70 年代 Stolen 等首次演示利用光纤的受激拉曼散射(SRS)<sup>[1]</sup>,产生光频的红移而获得新的光源以来,光纤的 SRS 和拉曼光纤激光器一直是人们研究的热点<sup>[2~6]</sup>。随着超低损耗的掺杂光纤和布拉格光栅技术的应用和发展<sup>[7]</sup>,光纤激光器的研究更加引起人们的关注。

但目前光纤激光器的研究,主要涉及的是位于红外和近红外波段的长波长光纤器件。而对于能够

在可见光范围内,特别是红光波段实现连续调谐的高功率光纤器件的研究却鲜见报道<sup>[8,9]</sup>。而能在红光波段实现宽范围连续调谐输出的激光器件如钛宝石激光器和染料激光器,价格昂贵,使用不方便,特别是对于某些生物医学应用,需要将激光经光纤传导输出,而光纤激光器正好能够满足这些领域的应用要求。我们利用 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器倍频输出的 532 nm 单频高功率激光作为抽运源,在红光波段附近开展了石英光纤的拉曼光谱研究,获得了宽带宽的、第 1 级到第 4 级 SRS 光谱,期望能进一步研制成功在可见光谱范围内波长可连续调谐的、实用方便的拉曼光纤激光器。

收稿日期 2000-12-25;收到修改稿日期 2001-09-29

作者简介:谷怀民(1966—)男,华南师范大学副教授,博士,2001 年赴香港大学研修,主要从事激光光谱、激光技术及激光生命科学研究。E-mail:guh@scnu.edu.cn

### 2 实验装置

采用半导体激光抽运的 Verdi-V10 型 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光作抽运源,经腔内倍频输出单频连续激光,波长 532 nm,最大输出功率 10 W。JY-T64000 型三光栅拉曼光谱仪由法国 Jobin Yvon 公司提供。单模石英光纤:1) SpecTran 产品, SMT - A1310B 型,模场直径 9.2 μm,长度 920 m;2) LG 产品, SM(AC)型,长度 250 m,光纤芯径 ~ φ 9 μm。

实验装置如图 1 所示,532 nm 的抽运光经显微镜物镜聚焦,由光纤耦合器耦合到单模石英光纤中,光纤输出的光谱信号进入拉曼光谱仪,由光谱仪扫描得到光谱数据,经计算机处理,得到拉曼光谱图。

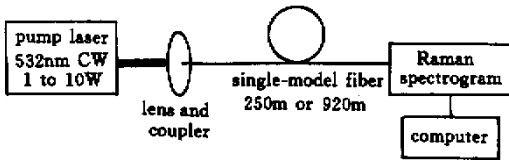


图 1 光纤受激拉曼散射光谱实验装置

Fig.1 Schematic diagram of the experiment on the SRS spectrum in fused silica fibers

### 3 实验结果和分析

分别研究了 250 m 和 920 m 长的单模石英光纤在单频 532 nm 激光激发下的 SRS。采用相同的实验装置,对其 SRS 光谱在宽范围内连续扫描,得到了光纤的多级宽带 SRS Stokes 光谱。不同级 SRS Stokes 光谱的确定,主要是根据整个扫描范围内光谱强度和光谱峰值的分布来进行初步判定。

图 2(a)(b)是在 4 W 的抽运功率激发下,250 m 长的单模石英光纤的第 1 级和第 2 级 SRS Stokes 光谱图,图 3 是相关文献<sup>[10]</sup>报道的石英光纤的 SRS 的相对增益的实验测量值的数字拟合曲线。图 4(a), (b)是长度为 920 m 的单模石英光纤在相同激发功率下的第 1 级和第 2 级 SRS Stokes 光谱。图 2(a)和图 4(a)的结果表明,尽管光纤长度不同,但它们的第 1 级 SRS Stokes 光谱结构特征几乎完全一致。相对于激发光而言,第 1 级 Stokes 光谱频带出现了频移,频移的主峰值位于 450 cm<sup>-1</sup>附近,接着 450 cm<sup>-1</sup> 主峰又出现一个 492 cm<sup>-1</sup> 的频移峰,在 606 cm<sup>-1</sup> 和 808 cm<sup>-1</sup> 附近又出现两个相对较弱的

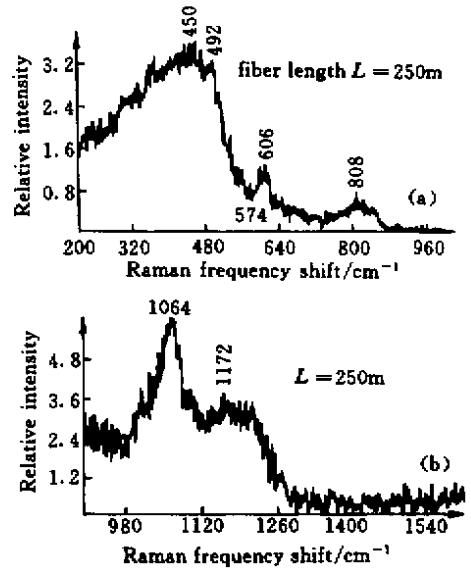


图 2 250 m 光纤的第 1 级(a)和第 2 级(b) SRS Stokes 光谱

Fig.2 The first order(a) and second order(b) SRS Stokes spectrum of 250 m fiber

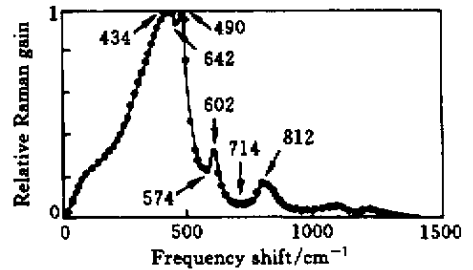


图 3 石英光纤 SRS 的相对拉曼增益的实验测量值的数字拟合曲线<sup>[10]</sup>

Fig.3 Relative gain digitized fit curve of stimulate Raman scattering for fused silica fibers

拉曼频移峰。整个第 1 级 SRS Stokes 光谱的带宽相当宽。

图 2(a)和图 4(a)的结果同文献<sup>[10]</sup>报道的曲线(图 3)比较发现,本实验测得的第 1 级 SRS Stokes 光谱结构特性与图 3 给出的 SRS 的相对增益曲线吻合得相当好,这反映了光纤的拉曼增益特性对其第 1 级 SRS Stokes 光谱结构起着决定性的作用,这同文献<sup>[10]</sup>的报道是一致的。虽然我们采用的激发波长与文献<sup>[10]</sup>不同,但拉曼散射的 SRS Stokes 光谱不同于激光诱导荧光中的 Stokes 位移,在拉曼散射中,入射光使分子上升到一个中间态,但这个中间态并非系统的某一电子本征态,而是一个“虚”激发态,再从这个“虚”激发态返回到其电子基态的不同振动态

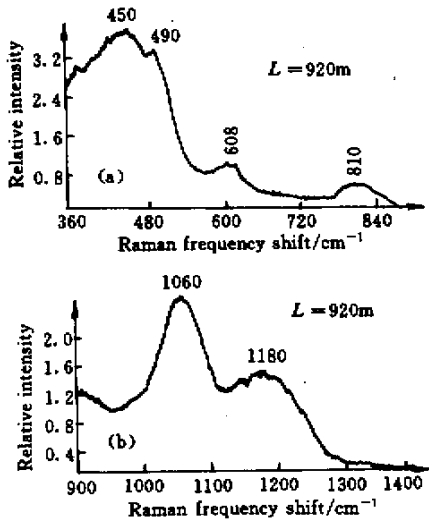


图4 920 m 光纤的第1级(a)和第2级(b) SRS Stokes 光谱

Fig.4 The first order (a) and second order (b) SRS Stokes spectrum of 920 m fiber

上,光子在 SRS 中的能量损失转移给了分子。因此,不同的激发波长虽然使分子跃迁到了不同的“虚”激发态,但都返回到相同的电子基态的振动态,因此,拉曼散射的 SRS Stokes 光谱只决定于电子基态的能态分布,与激发波长无关。

出现宽带 SRS Stokes 光谱的主要原因是由于石英光纤材料的非结晶结构特性引起的。因为在熔融石英这类非定型材料中,由于分子的振动能级的多量子化和振动频率连续扩展,使得同分子能级跃迁直接相关的 SRS 光频带互相重叠,形成一个很宽的连续带。因此,与大多数介质中的拉曼光谱只出现在某些特定的频率上的现象不同,石英光纤的拉曼增益在一个很宽的频带范围内扩展成一个连续带。虽然增益截面小,但低损耗光纤使其可以充分利用其很长的相互作用长度来获得很高的增益,因此石英光纤的 SRS Stokes 光谱扩展成为一个很宽的连续带。

从图 2(b)和图 4(b)的结果可以看出,不同长度光纤的第 2 级 Stokes 光谱的结构特征仍然是一致的,其主峰在  $1060\text{ cm}^{-1}$  附近,另一个相对较弱的频移峰位于  $1180\text{ cm}^{-1}$  附近,两峰之间有一弱的低谷在  $1124\text{ cm}^{-1}$  附近。比较图 2(a)和图 4(a),图 2(b)和图 4(b)发现,尽管对于长度不同的光纤其拉曼光谱结构接近,但在相同抽运激发功率下,其 SRS 光谱

信号强度却相差很大,特别是第 2 级 Stokes 光谱的信号强度相差了两个数量级,这说明光纤长度对 SRS 的光谱强度有相当显著的影响。

图 5(a)(b)给出了长度为 920 m 的单模石英光纤的第 3 级和第 4 级 SRS Stokes 光谱,可以看出,第 3 级和第 4 级 SRS Stokes 光谱基本上为单峰结构,其中第 3 级 Stokes 光谱频移峰位于  $1610\text{ cm}^{-1}$  附近,第 4 级 Stokes 光谱峰值位于  $2168\text{ cm}^{-1}$  附近。而对于长度为 250 m 的单模石英光纤,其第 3 级 Stokes 光谱虽然在我们的实验中也能观察到,但信号很弱,分辨率很差,而其第 4 级 Stokes 光谱则没有观测到。

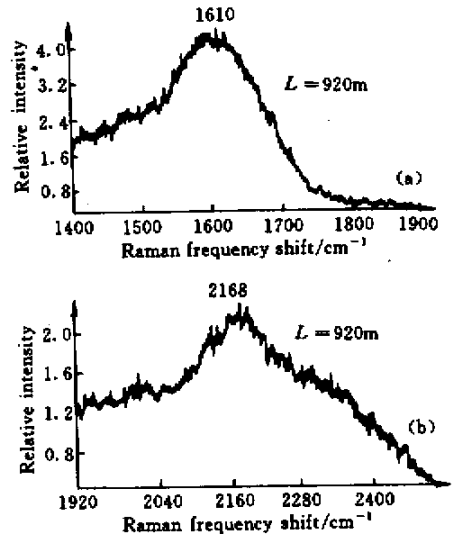


图5 920 m 光纤的第3级(a)和第4级(b) SRS Stokes 光谱

Fig.5 The third order (a) and fourth order (b) SRS Stokes spectrum of 920 m fiber

研究结果还表明,对于长度为 920 m 的光纤,其第 1 级和第 2 级 Stokes 光谱实际上是连成一个整体,形成了一个更宽的连续光谱带。但第 2 级和第 3 级 Stokes 光谱之间不是一个连续的整体,第 3 级 Stokes 光谱是一个独立的、带宽相对较窄的连续光谱带。

从光谱结构可见,长光纤和短光纤的同级 SRS Stokes 光谱结构基本一致;但从光谱强度而言,长光纤的所有 SRS Stokes 光谱强度都比短光纤的同级 Stokes 光谱强度高,特别是对于较高级的第 3 级和第 4 级 Stokes 光谱,250 m 的短光纤的光谱信号已无法准确测得。而对于相同长度的光纤而言,随着

Stokes 光谱级别的提高,其光谱强度也逐级减弱,带宽也逐级变窄。如前所述,光谱强度逐级变弱的原因,主要是由于光纤的增益和实际注入抽运功率还不够高。因为光纤长度越长,其总的增益系数就越高,SRS 光谱信号才能得到更高的增益放大。只有当光纤的总增益系数和注入抽运功率足够强时,其前一级 SRS Stokes 光谱信号得到充分放大,并达到相对饱和值之后,其较高一级的 Stokes 光谱才能逐级获得增益放大,并最终得到较强的高一级 Stokes 光谱输出,这也正是采用较短长度的 250 m 光纤无法进一步获得第 3 级和第 4 级 SRS Stokes 光谱的原因。因此,从实际应用考虑,要真正研制拉曼光纤激光器,作为增益介质的单模光纤必须达到一定长度。

本研究表明,采用 532 nm 的单频激光来抽运单模石英光纤,能在可见光谱范围内(红光波段)获得带宽很宽的、连续的、多级 SRS Stokes 光谱;从实验上表明研制在可见光谱范围内波长可连续调谐的、实用方便的、连续单模光纤激光器是可行的。

致谢 作者对刘刚博士在拉曼光谱测试中给予的协助表示衷心感谢。

### 参 考 文 献

- 1 R. H. Stolen, E. P. Ippen, A. R. Tynes. Raman oscillation in glass optical waveguide[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1972, **20** (2): 62 ~ 64
- 2 F. Irrera, L. Mattiuzzo, D. Pozza. Generation of high intensity CW stimulated Raman scattering in a single-mode fiber [J]. *J. Appl. Phys.*, 1988, **63**(8): 2882 ~ 2883
- 3 A. Bertoni, G. C. Reali. 1.24- $\mu\text{m}$  cascaded Raman laser for 1.31- $\mu\text{m}$  Raman fiber amplifiers[J]. *Appl. Phys. B*, 1998, **67**(1): 5 ~ 10
- 4 N. S. Kim, M. Prabhu, C. Li. 1239/1484 nm cascaded phosphosilicate Raman fiber laser with CW output power of 1.36W at 1484 nm pumped by CW Yb-doped double-clad fiber laser at 1064 nm and spectral continuum generation[J]. *Opt. Comm.*, 2000, **176**(1/3): 219 ~ 222
- 5 V. I. Karpov, E. M. Dianov, V. M. Paramonov *et al.*. Laser-diode-pumped phosphosilicate-fiber Raman laser with an output power of 1 W at 1.48  $\mu\text{m}$ [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24** (13): 887 ~ 889
- 6 Matteo Rini, Ilaria Cristiani, Vittorio Degiorgio *et al.*. Numerical modeling and optimization of cascaded CW Raman fiber lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2000, **36** (10): 1117 ~ 1122
- 7 P. Persephonis, S. V. Chernikov, J. R. Taylor. Cascaded CW fibre Raman laser source 1.6 ~ 1.9  $\mu\text{m}$ [J]. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(16): 1486 ~ 1487
- 8 Mira Naftaly, Caroline Batchelor, Animesh Jha.  $\text{Pr}^{3+}$ -doped fluoride glass for a 589 nm fiber laser [J]. *Journal of Luminescence*, 2000, **91**(3 ~ 4): 133 ~ 138
- 9 Pierre Laperle, Real Vallee, Alain Chandonnet. Stability aspects in the operation of a 2500-ppm thulium-doped ZBLAN fiber laser at 481 nm[J]. *Opt. Comm.*, 2000, **175**(1 ~ 3): 221 ~ 226
- 10 Katherine X. Liu, Elsa Garmire. Understanding the formation of the SRS Stokes spectrum in fused silica fiber[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1991, **27**(4): 1022 ~ 1030