

苯乙醇液芯光纤受激喇曼散射 的红移和蓝移展宽*

陈逸清 王 磊 邱明新

(上海市激光技术研究所, 上海 200233)

提 要

本文首次用调Q YAG 激光器的倍频光($\lambda=532.1\text{ nm}$)在苯乙醇液芯光纤中产生受激喇曼散射, 观察到了4阶斯托克斯线和2阶反斯托克斯线。讨论了引起红移为主的斯托克斯线展宽的原因。

关键词: 液芯光纤, 受激喇曼散射。

一、引 言

E. J. Woodbury 和 W. K. Ng^[1] 首次使用液体硝基苯观察到受激喇曼散射(SRS)。从此, 有关这方面的研究发展迅速。E. P. Ippen 曾在 OS_2 液芯光纤中研究了受激喇曼散射^[2], 获得了波长为 532.5 nm 的斯托克斯线。J. Stone^[3] 在苯液芯光纤中观察到了受激喇曼效应, 而 A. R. Chraplyvy 等人^[4] 用波长为 $1.06\text{ }\mu\text{m}$ 的YAG激光在充有 CBrCl_3 的光纤中获得了红外波段的斯托克斯线。另外, 赫光生等人^[5]在苯液芯光纤中亦对斯托克斯线进行了研究。

对于液芯光纤受激喇曼散射, 首先, 液体折射率必须大于空心光纤包层的折射率, 以构成波导, 这样才能保证光能量最大限度地集中在液芯光纤中。其次, 希望所选择的液体的光吸收系数和散射要小, 以便尽可能地降低光在这种液芯光纤中的传输损耗。当然, 传输损耗还与光纤的几何参数, 如芯径均匀性、内表面光滑程度等特性有关。另外, 液体的喇曼散射截面必须足够大, 才能在光纤中产生受激喇曼散射。最后, 还要考虑到液体的光学稳定性及其毒性。

在液芯光纤中研究受激喇曼散射, 不仅能以比较低的泵浦光得到高阶斯托克斯线, 而且由于转换效率的提高而有可能将这些斯托克斯线作为一种新的相干辐射光源。

本文中, 以调Q YAG 激光器的倍频光为泵浦源, 首次在苯乙醇液芯光纤中观察到4阶斯托克斯线和2阶反斯托克斯线。测量了各阶斯托克斯线的红移和蓝移展宽与其阶数的关系, 以及产生各阶斯托克斯线的泵浦阈值, 对以红移为主的斯托克斯线的展宽进行了分析。

二、实 验 装 置

图1是实验装置图。调Q YAG 激光器产生波长为 $1.06\text{ }\mu\text{m}$ 的激光, 通过KDP倍频

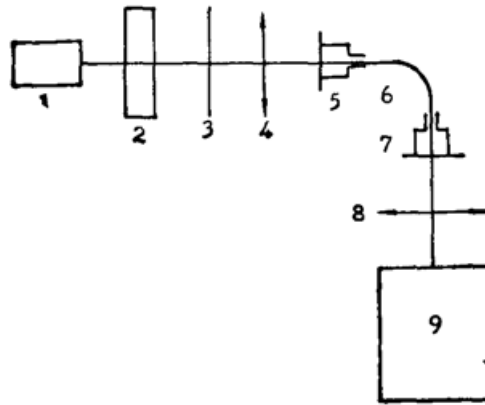


Fig. 1 Experimental set-up of stimulated Raman scattering

1—Nd:YAG laser; 2—KDP crystal; 3—filter; 4, 8—lens; 5, 7—liquid cell; 6—optical filter; 9—spectrometer

晶体后, 成为波长为 532.1 nm 的绿光。当把 532.1 nm 的绿光与 $1.06 \mu\text{m}$ 的光用滤光片分离后, 用一焦距为 10 cm 的透镜将泵浦光聚焦, 并入射到长 400 cm , 内径 $150 \mu\text{m}$, 充苯乙醇的光纤中。苯乙醇是一种粘滞的无色透明液体, 其折射率为 1.532 , 大于用 GG17 玻璃拉制成的光纤的折射率 (1.472)。聚焦后, 光斑面积约为 $1 \times 10^{-2} \text{ cm}^2$ 。 532.1 nm 绿光的脉冲宽度为 10 ns , 脉冲重复率为 1 pulse/sec , 光能量从 0 到 2 mJ 可调。光纤两端都浸在液池中, 并充有相同液体, 一方面避免了激光入射到光纤时由于折射率不匹配所引起的损耗, 另一方面保证了光纤中苯乙醇不易挥发掉。另外在实验中, 应避免光纤较大的弯曲以减少不必要的损耗。最后, 将从光纤另一端出射的光通过另一焦距为 15 cm 的透镜聚焦到长两米的摄谱仪入射狭缝。

三、实验结果与讨论

调整光路使 532.1 nm 的绿光很好地耦合进液芯光纤, 在光纤的输出端光的颜色呈橘红色, 同时在摄谱仪的屏幕上可明显地看到基波和 1 至 3 阶斯托克斯线, 而 4 阶斯托克斯线和反斯托克斯线由于太弱, 只有增加曝光时间才能拍摄到 (如 4 阶斯托克斯线经过 1800 次脉冲, 1 和 2 阶反斯托克斯线则经过 7200 次脉冲)。

图 2 是拍摄到的苯乙醇液芯光纤受激喇曼散射谱。表 1 给出了苯乙醇各阶斯托克斯线波长、红移和蓝移的展宽, 及各阶斯托克斯线的阈值。当泵浦光强较小时, 只有基波和 1 阶斯托克斯线; 当增加泵浦光强时, 随着 1 阶斯托克斯线强度的增加, 出现了 2 阶斯托克斯线; 若再增加泵浦光强, 则会出现更高阶的斯托克斯线。1 阶反斯托克斯线只有在 1 阶斯托克斯线出现后才产生。反斯托克斯线的存在说明在液芯光纤中除受激喇曼散射外, 还有其它

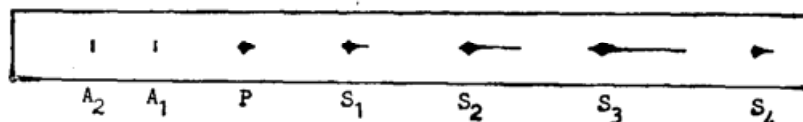


Fig. 2 The stimulated Raman scattering spectrum from a phenylethanol liquid-core optical fiber

Table 1 The wavelength, broadening and threshold of SRS spectrum in a phenylethanol liquid-core optical fiber

spectrum		A 2	A 1	P	S1	S2	S3	S4*
wavelength (nm)		480.9	502.2	532.1	562.0	595.5	633.2	676.0
broadening (nm)	red-shift			2.37	6.76	18.93	24.67	5.75
	blue-shift			1.35	1.58	2.03	4.23	0.68
threshold (W/cm ²)					3.0*10 ⁶	5.5*10 ⁶	8.6*10 ⁶	

* The red-shift and blue-shift broadenings of the 4th order stokes line are only referential because of its weakness.

非线性光学过程,如四波混频(FWM)。若考虑到四波混频过程对各阶斯托克斯线的贡献,则对于第 j 阶斯托克斯线的场分量可表示为:

$$\begin{aligned} \frac{dE_{js}}{dz} = \frac{i2\pi\omega_{js}}{cn_{js}} & \left[\sum_{i \neq j} \alpha''_{is, js} E_{is} E_{is}^* E_{js} \exp(-i\Delta k_{is, js} z) \right. \\ & + \alpha''_{(j-1)s, 1s} E_{(j-1)s} E_0^* E_{1s} \exp(-i\Delta k_{(j-1)s, 1s} z) \\ & + \alpha''_{(j-1)s, 2s} E_{(j-1)s} E_{1s}^* E_{2s} \exp(-i\Delta k_{(j-1)s, 2s} z) \\ & + \alpha''_{(j+1)s, 1s} E_{(j+1)s} E_{2s}^* E_{1s} \exp(-i\Delta k_{(j+1)s, 1s} z) \\ & + \alpha''_{(j-1)s, 3s} E_{(j-1)s} E_{2s}^* E_{3s} \exp(-i\Delta k_{(j-1)s, 3s} z) \\ & \left. + \dots \right] \end{aligned} \quad (1)$$

式中 ω_{js} , n_{js} 分别为第 j 阶斯托克斯线的频率、折射率; E_0 为泵浦光的场分量; c 为光速; Δk 为不同斯托克斯线的波矢差; α'' 为三阶非线性极化系数。

然而,由于光纤中相位匹配较差使四波混频过程非常弱,(实验中确实如此,反斯托克斯线的强度大大小于斯托克斯线的强度),因此,对于斯托克斯线,受激喇曼过程大大强于该过程,并考虑到第 j 阶斯托克斯线只有在前一阶斯托克斯线出现后才产生,则(1)式就可简化成通常的表达式:

$$\frac{dE_{js}}{dz} = \frac{i2\pi\omega_{js}}{cn_{js}} \left[\alpha''_{(j-1)s, js} E_{(j-1)s}^2 E_{js} + \alpha''_{(j+1)s, js} E_{(j+1)s}^2 E_{js} \right] \quad (2)$$

上式表示各阶斯托克斯线在一定程度上能相互耦合形成一种集体振荡,泵浦光不致完全地被抽空,后一阶斯托克斯线的振荡也不完全地抽空前一阶斯托克斯线。

从图 2 看到,各阶斯托克斯线都有红移和蓝移展宽,而且展宽幅度随阶数的增加而增加(如图 3 所示),但是,红移展宽比蓝移展宽大得多。对于第 3 阶斯托克斯线,红移展宽达 24.67 nm 或 592 cm^{-1} ,蓝移展宽亦有 4.23 nm 或 106 cm^{-1} 。

由于喇曼介质在强光场($10^6 < I_0 < 10^9 \text{ W/cm}^2$)作用下,介质中的非对称分子将重新取向和重新分布,并导致介电常数的非线性变化。通常把这种现象称为受激瑞利翼散射(SRWS)^[6]。这种介电常数的非线性变化可表示为:

$$\Delta\epsilon^{(NL)} = \frac{2N\tau_{RW}(\Delta\alpha)^2}{15\eta} \quad (3)$$

式中 N 为介质分子密度; η 为液体的粘滞系数。

$$\Delta\alpha = \alpha_{\parallel} - \alpha_{\perp} \quad (4)$$

其中 α_{\parallel} 和 α_{\perp} 分别表示平行和垂直于分子轴线的介质极化率; τ_{RW} 为介质分子德拜弛豫时间。

$$\tau_{RW} = 4\pi a^3 \eta / 3k_B T \quad (5)$$

其中 a 为介质分子的平均半径; k_B 为玻耳兹曼常数; T 为温度。

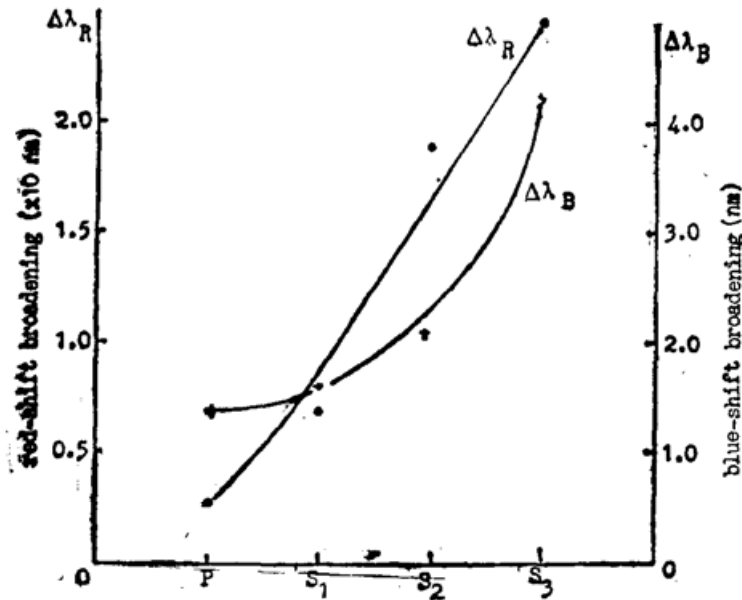


Fig. 3 The dependence of the red-shift and blue-shift broadenings of Stokes line on its order number

受激瑞利翼散射强度与泵浦光强度 I_0 , 介质增益系数 g_{RW} , 光吸收系数 α , 在介质中相互作用长度 z 等参数成指数关系:

$$I_{RW}(z) = I_{RW}(0) \exp[(g_{RW}I_0 - \alpha)z], \quad (6)$$

式中 $I_{RW}(z)$ 为介质中 z 距离上的 SRWS 强度, 而增益系数 g_{RW} 可表示为:

$$-g_{RW}^A \doteq g_{RW}^S = g_{RW} = \frac{32\pi^2 \omega_s N (\Delta\alpha)^2}{45 k_B T c^2 n^2} \cdot \frac{\Delta\omega \tau_{RW}}{1 + \Delta\omega^2 \tau_{RW}^2}, \quad (7)$$

式中 $\Delta\omega = \omega_0 - \omega_s = \omega_a - \omega_0$. 对于苯乙醇, $\eta \sim 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, $a \sim 10^{-10} \text{ m}$, 则由式(5)可知, $\tau_{RW} \sim 10^{-12} \text{ s}$. 对于泵浦光的 SRWS 增益系数 g_{RW} , 此时, $\omega_s \sim 10^{14} \text{ s}^{-1} (10^4 \text{ cm}^{-1})$, 由文献[6]知 $\frac{32\pi^2 N (\Delta\alpha)^2}{45 k_B T} \sim 10^{-9} \text{ m}^3 \text{ J}^{-1}$, 若取 $\Delta\omega = \frac{1}{\tau_{RW}} = 10^{12} \text{ s}^{-1} (10^2 \text{ cm}^{-1})$, 则从式(7)得到 $g_{RW} \sim 10^{-3} \text{ cm/MW}$. 该值与大多数液体中的喇曼增益同量级, 表明由 SRWS 引起的展宽可达到 10^2 cm^{-1} . 在作者先前所做的乙基苯液芯光纤 SRS 实验中, 泵浦光的整个展宽亦有 $119 \text{ cm}^{-1} (3.4 \text{ nm})$ [7].

至于 1 阶斯托克斯线的展宽, 可归结为两个方面, 即泵浦光的展宽和在光纤中传输时 SRWS 引起的展宽, 因而 1 阶斯托克斯线的展宽要大于泵浦光的展宽. 对于高一阶斯托克斯线的展宽, 均在低一阶斯托克斯线展宽的基础上进一步展宽. 因此, 各阶斯托克斯线的展宽随阶数增加而增加.

另外, 从式(7)可见, SRWS 的反斯托克斯线的增益 g_{RW}^A 是负的, 其绝对值近似等于斯托克斯线的增益 g_{RW}^S . SRWS 中的反斯托克斯线是通过泵浦光和斯托克斯线的四波混频过

程产生的。由于它的增益是负的,因而在光纤中传输时会很快衰减,所以 SRS 的蓝移展宽比红移展宽小得多。

在克尔系数很大的液体中,由于光场感应折射率的变化 $\Delta n = n_2 |E|^2$ 常引起自聚焦。当介质中出现自聚焦时,由于各类非线性过程都有可能超过其阈值,因而它们也会同时被激励。例如转动态受激喇曼散射,自相位调制,受激布里渊散射过程等等。这些非线性过程也会导致喇曼谱线的红移和加宽,并随着泵浦光功率的增大而会进一步增强。

参 考 文 献

- [1] E. J. Woodbury, W. K. Ng; *Proc. IRE*, 1962, **50**, 2347.
- [2] E. P. Ippen; *Appl. Phys. Lett.*, 1970, **16**, No. 8 (Apr), 303.
- [3] J. Stone; *Appl. Phys. Lett.*, 1975, **26**, No. 4 (Feb), 163.
- [4] A. R. Chralyvy, T. J. Bridges; *Opt. Lett.*, 1986, **6**, No. 12 (Dec), 623.
- [5] He Guang-Sheng *et al.*; *Chinese Phys. Lett.*, 1985, **2**, No. 10 (Oct), 477.
- [6] Y. R. Shen; *«The Principles of Nonlinear Optics»*, (John Wiley & Sons, Inc., 1984), 195.
- [7] Mingxin Qiu *et al.*; *Opt. Comm.*, 1990, **79**, No. 5 (Mar), 473.

Red-shift and blue-shift broadenings of Stimulated Raman Scattering in the phenylethanol liquid-core optical fiber*

CHEN YIQING, WANG LEI AND QIU MINGXIN

(Shanghai Institute of Laser Technology, Shanghai 200233, China)

(Received 23 January 1991; revised 17 June 1991)

Abstract

It is the first time to obtain the Stimulated Raman Scattering (SRS) in the phenylethanol liquid-core optical fibre by using the frequency-doubling of Q-switched YAG laser ($\lambda = 532.1 \text{ nm}$). The fourth-order Stokes line and the second-order anti-Stokes line in this liquid have been observed. The cause of the broadenings favouring red-shift of the Stokes lines has been discussed.

Key words: liquid-core optical fiber; SRS.

* This project is supported by the National Foundation of Nature Science.