

准单模光纤中受激喇曼散射(SRS)的时间特性和光谱特性

段春立* 赵庆春 董景元 陆雨田 何慧娟**

(中国科学院上海光机所激光技术开放研究实验室, 201800)

摘要: 本文报道了在准单模石英光纤中对于 ps 泵浦脉冲, 研究了多级 SRS 脉冲、泵浦光脉冲的时间特性和光谱特性以及它们之间的时间分离。发现 SRS 转换效率很高(80%以上), 并且 SRS 的产生位置距光纤输入端很近(1.5m), 对于 63m 光纤, 观察到几乎连续的 9 级 SRS 光谱

关键词: 准单模光纤, 多级 SRS

Temporal and spectroscopic characteristics of multi-order SRS in quasi-monomode optical fiber

Duan Chunli, Zhao Qingchun, Dong Jingyuan, Lu Yutian, He Huijuan

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai)

Abstract: The temporal and spectroscopic characteristics of multi-order SRS pulses, pumping pulse, and their temporal separation in quartz quasi-monomode optical fiber are reported for ps pumping pulses. High conversion efficiency (over 80%) of SRS is found experimentally at high pumping power, and the place for SRS generation is close to the input end of the optical fiber (1.5m). Almost continuous orders of SRS spectrum have been observed for a 63m long optical fiber.

Key words: quasi-monomode fiber, multi-order SRS

用激光, 特别是 PS 激光很容易在光纤中产生高的功率密度和长的相互作用距离, 因此, 各种非线性效应, 尤其是 SRS 很容易获得。

对于光纤中的 SRS, 在理论和实验上都有了不少研究^[1-5]。本文用 PS 超短脉冲, 在芯径 $9\mu\text{m}$ 的准单模光纤中, 以高功率密度激发 SRS, 研究了 SRS 脉冲及泵浦脉冲的时间特性和光谱特性。

一、实验装置

图 1 是研究光纤中 SRS 时间特性和光谱特性的实验装置。SRS 的泵浦光源是主被动锁模 Nd:YAG 激光器, 经 KDP 晶体倍频后, 波长为 532nm , 脉冲宽度 40ps , 最大峰值功率 10MW 。光纤是锗掺杂的石英玻璃光纤, 芯径为 $9\mu\text{m}$, 截止波长为 900nm , 折射率差为

收稿日期: 1989年12月15日。

* 上海光机所 87 级硕士研究生。

** 参加本工作的还有李永春、顾圣如、钱林兴、赵隆兴、郭晶华等同志。

0.4%，损耗为 3.1 dB/km(在波长 700 nm)，无量纲色散 $D(\lambda) = 0.073(\lambda = 532\text{nm})$ 。用 BWS-5K 条纹相机记录光纤输出波形，其分辨时间为 5ps。31WII 型 2m 光栅摄谱仪和 RL1024G 硅二极管阵列相结合测量光纤的输出光谱。实验中，分别研究了四种长度的光纤： $L_1 = 63\text{m}$ ， $L_2 = 45.62\text{m}$ ， $L_3 = 22.96\text{m}$ ， $L_4 = 7.62\text{m}$ 。通过调节光纤的输入耦合改变泵浦功率。

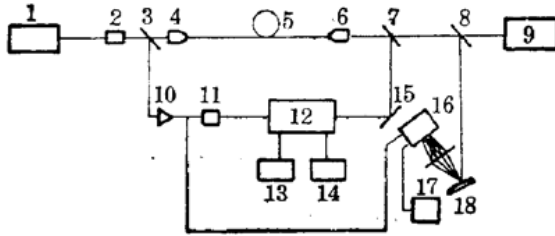


图1 实验装置图

1—Nd:YAG 激光器；2—KTP 晶体；3、7、8、15—分束镜；4—10 倍物镜；5—光纤；6—40 倍物镜；9—摄谱仪；10—光电转换器；11—延迟网络；12—条纹相机；13—绘图仪；14—荧光屏；16—硅二极管阵列；17—示波器；18—光栅；19—柱透镜

二、实验结果与分析

由于光纤的色散，导致 SRS 的 Stokes 脉冲和泵浦的基频光(532 nm)脉冲在光纤中传输时发生时间上的分离。按参考文献[4]定义的分离长度 l 为 Stokes 脉冲超前基频光脉冲一个泵浦光脉冲宽度 T (FWHM) 对应的光纤长度：

$$l = \left(\frac{V_s \cdot V_p}{V_s - V_p} \right) T \quad (1)$$

其中 V_s, V_p 分别是 Stokes 光和泵浦光在光纤中的群速度， T 是泵浦光脉冲的宽度(FWHM)。

当 SRS 的 Stokes 脉冲产生后，经过 ΔL 距离传输，Stokes 脉冲超前基频光脉冲，其相对时间延迟 Δt 为

$$\Delta t = \frac{\Delta L}{c} D(\lambda) \frac{\Delta \nu}{\nu} \quad (2)$$

其中 $\Delta \nu$ 是 SRS 的 Stokes 频移， ν 是基频光的频率， $D(\lambda)$ 是光纤的无量纲色散。对于 532 nm 的基频光， $D(\lambda) = 0.073$ ， $\nu/c = 18577\text{cm}^{-1}$ ， $\Delta \nu/c = 440\text{cm}^{-1}$ 。

当泵浦光为 532 nm 时，一级 Stokes 光为 545 nm，根据(2)式， Δt 为一个脉冲宽度时，可计算出分离长度 $l = 6.94\text{m}$ 。

图 2 是不同长度光纤的输出波形。其中 P 是基频光脉冲， S_1, S_2 以及图 5、图 6 中的 $S_3, S_4, S_5, S_6, S_7, S_8$ 和 S_9 分别是 1 级、2 级... 和 9 级 SRS 光。

图 2(a) 是 $L = 7.62\text{m}$ 的输出波形，(b)、(c)、(d) 分别是 $L = 22.96\text{m}$ 、 45.62m 、 63m 的输出。由于受到条纹相机的动态范围和阴极的光谱响应所限，只得到第 1 级和第 2 级 SRS 的 Stokes 光脉冲以及基频光脉冲的波形。从图上可估算出 SRS 的转换效率在 80% (即各级 Stokes 光能量之和与输入光能量之比) 以上。进入光纤前，泵浦光脉冲的宽度为 40 ps。

图 3 是 SRS 脉冲和基频光脉冲的脉冲宽度随光纤长度变化的曲线。其中 (a) 是基频光脉宽随长度的变化曲线。由于光脉冲在光纤中受到自相位调制和互相位调制(cross PM)作用，使得其光谱具有啁啾特性，同时在群速度色散的作用下，导致脉冲宽度随 L 的增加而加大。泵浦光从输入的 40 ps 增大到 $L = 22.96\text{m}$ 的 48 ps； $L = 45.62\text{m}$ 时又增加到 69 ps； $L = 63\text{m}$ 时，脉宽达到 88 ps，比输入脉宽大了一倍。(b) 是 2 级 Stokes 脉冲的脉宽随光纤长度变化曲线。 $L = 22.96$

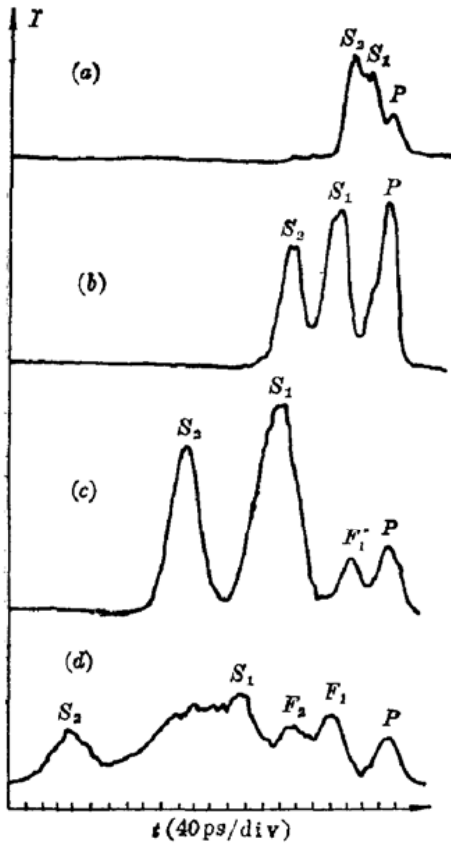


图2 不同长度光纤的输出波形

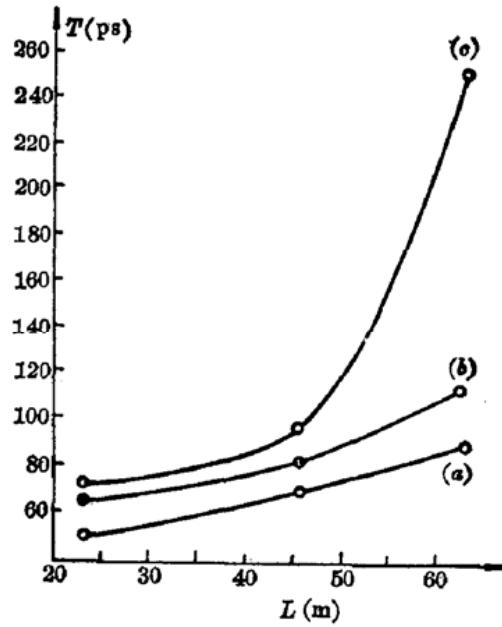


图3 基频光和 Stokes 光脉冲宽度随光纤长度的变化曲线

m 时, 脉宽为 64 ps ; $L=45.62 \text{ m}$ 时, 脉宽为 80 ps ; 而 $L=63 \text{ m}$ 时, 脉宽达到 112 ps , 约为输入泵浦光脉宽的 3 倍。(c) 是 1 级 Stokes 脉冲宽度随长度变化曲线。 $L=22.96 \text{ m}$ 时, 脉宽 70 ps ; $L=45.62 \text{ m}$, 脉宽 90 ps ; $L=63 \text{ m}$ 时, 脉宽达到 256 ps , 是输入泵浦脉冲宽度的 6 倍多。从图中可看出 Stokes 脉冲宽度的增加比泵浦光脉冲宽度的增加更大。在准单模工作情况下, 虽然光纤中只有少数几个低阶模, 但模式间的色散仍是脉宽加大的因素之一。因而对于泵浦光, 频率啁啾效应和模间色散造成其光谱展宽, 同时由于群速度色散的作用决定了泵浦光脉冲的加宽。对于 Stokes 脉冲, 其光谱加宽除了频率啁啾效应和模间色散的作用外, 还有 Raman 增益谱加宽, 因而 Stokes 光的光谱加宽要大于泵浦光的光谱加宽(见图 5), 使得 Stokes 光在群速度色散作用下造成的脉冲加宽也大。从图 3 还可以看出 1 级 Stokes 脉冲宽度在长光纤时 (62 m) 比 2 级 Stokes 脉宽变化大, 这是由多种原因造成的, 主要原因是 1 级 Stokes 脉冲比 2 级强度大, 其啁啾加宽也大, 而光纤在可见光部分是群速度正色散区, 1 级 Stokes 光 (545 nm) 的色散大于 2 级 (558 nm) 的色散, 在两者的联合作用下, 随光纤长度的增加, 1 级 Stokes 脉宽的加宽比 2 级更剧烈。

图 4(a) 和 (b) 分别是一级 Stokes 脉冲和二级 Stokes 脉冲与基频光脉冲间的相对时间延迟随光纤长度变化曲线。从图上可看出, 在高转换效率 (80% 以上) 时, Stokes 脉冲与基频光脉冲的相对时间延迟在相同光纤长度下, 比低转换效率^[4] 时大。根据 (2) 式可以计算出 SRS 脉冲产生的位置比低转换效率条件下更接近光纤的输入端。例如: $L=22.96 \text{ m}$ 时, 1 级 Stokes 光与基频光的时间延迟为 122 ps , 则产生 SRS 的位置距光纤输入端为 1.5 m , 即在一个分离长度之内已产生 SRS, 甚至产生 4 级 SRS(图 5), 这与低转换效率下的情况明显不同^[4]。

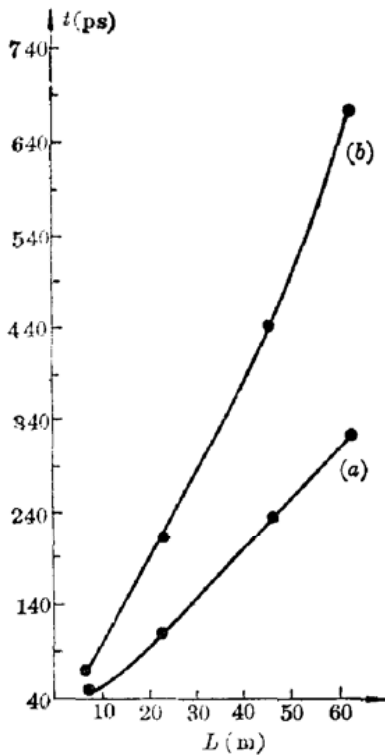


图4 Stokes光脉冲相对于基频光脉冲的相对延迟时间随光纤长度的变化曲线

图5是由摄谱仪得到的 $L=7.62\text{ m}$, 即约一个分离长度的光纤的输出光谱。随 Stokes 级数的增加, 各级 Stokes 脉冲的光谱宽度逐渐加大。1 级 Stokes 谱宽 $\Delta\nu=90\text{ cm}^{-1}$; 2 级 Stokes 谱宽 $\Delta\nu=167.6\text{ cm}^{-1}$, 3 级 Stokes 谱宽 $\Delta\nu=213\text{ cm}^{-1}$ 。

图6是长度为 63 m 光纤的输出光谱, 由硅二极管阵列记录。曲线显示了9级 SRS 谱, 并且具有连续特性, 说明各级的加宽谱已经相互交迭。根据参考文献[1]的报道, 用 7 ns 脉冲在多模光纤中激发 SRS, 当光纤长度为 480 m 时, 第4级 Stokes 光以后才具有连续光谱。由此可见, 用 ps 脉冲泵浦光纤比用 ns 脉冲更容易产生连续的宽带光谱输出。

综上所述, 用 ps 脉冲在准单模光纤中激发 SRS, 由于使用 ps 脉冲及准单模光纤比用 ns 脉冲在多模光纤中更容易得到高功率密度, 因此也更容易产生多级 SRS, 并且转换效率高, 同时又避免了用单模光纤时输入耦合难的问题。另外, 与低泵浦强度下的 SRS 不同, 它可以在一个分离长度内产生多级 SRS, 随着光纤长度的增加, SRS 的级数、脉冲宽度和光谱宽度都增加。其输出光谱可宽达 140 nm 的连续谱, 这对于 ps 吸收光谱研究来说, 是一个廉价的 ps 宽光谱源。

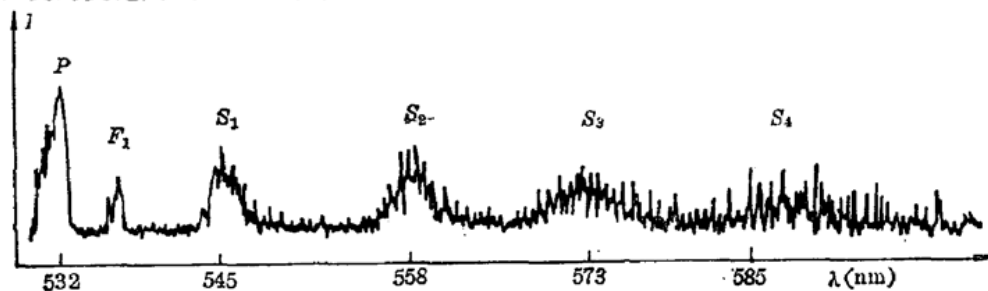


图5 $L=7.62\text{ m}$ 光纤的输出光谱

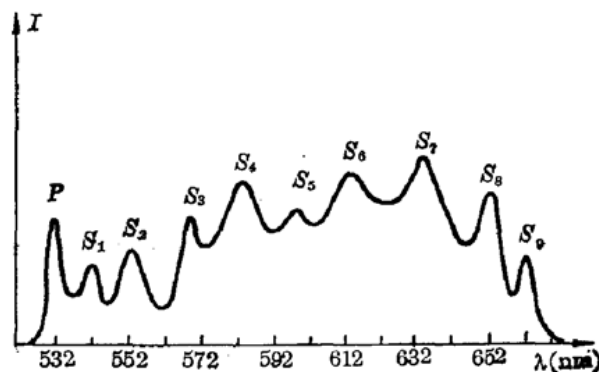


图6 $L=63\text{ 米}$ 光纤的输出光谱

参 考 文 献

- 1 高佩娟 *et al.*, 激光, 7 (4), 11 (1980)
- 2 A. M. Weiner *et al.*, *J. Opt. Soc. Am. B*, 5, 364 (1988)
- 3 R. H. Stolen *et al.*, *J. Opt. Soc. Am. B*, 1, 652 (1984)
- 4 R. H. Stolen *et al.*, *IEEE J. Quant. Electr.*, QE-22, 2154 (1986)
- 5 D. Schadt *et al.*, *J. Opt. Soc. Am. B*, 4, 856 (1987)