

用光纤获得十级受激喇曼散射

高佩娟 聂朝江 杨天龙 舒海珍

(中国科学院上海光机所)

提 要

本文报导了用多模光纤获得受激喇曼散射的实验研究。用 480 米长、多模、低损耗的梯度型石英光纤,用重复率为 5 次/秒和 10 次/秒、脉宽 7 毫微秒、功率 0.7 兆瓦的 YAG:Nd 倍频 532 毫微米的激光泵浦,获得了从 546~702 毫微米的十级斯托克斯受激散射。

10 orders of stimulated Raman scattering obtained from an optical fiber

Gao Peijuan Nie Chaojiang Yang Tianlong Su Haizheng
(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

Abstract

This paper describes the experimental investigation of stimulated Raman scattering obtained from a multimode fiber. 10 orders of stimulated Stokes scattering of wavelengths ranging in 546~702 nm have been obtained from a 480 m, multimode, low-loss, graded quartz fiber pumped by a 532 nm frequency-doubled YAG:Nd laser beam with a pulse duration of 7 ns, output power of 0.7 MW and repetition rates of 5 and 10 PPS.

近年来,人们已注意到光纤的非线性效应。虽然光纤的非线性效应有低的功率阈值,对应用于通讯的光能量是一个限制,但却有利于纤维非线性光学器件的实现。

在受激喇曼散射过程中,设在泵浦的初始时刻,媒质中不存在任何喇曼散射频率上的光子,则散射光子可在任一辐射模中散射,散射到某个模中的几率正比于抽运波的强度 I_p :

$$w_{sp} = \frac{d\sigma}{d\Omega} \frac{I_p}{h\nu_p} M^{-1} \quad (1)$$

w_{sp} 叫做自发散射的几率, $\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)$ 是强度 I_p 、频率 ν_p 的泵浦光的总散射跃迁截面; M 是

体积 V 和频率带宽 $\Delta\nu_{sp}$ 中的模数:

$$M = \left(\frac{8\pi\nu_s^2}{V_s^3}\right) V \Delta\nu_{sp} \quad (2)$$

其中 ν_s 是散射光频率; $V_s = \frac{c}{n_s}$ 为激活媒质中光的速度, n_s 是介质的折射率。假如在一个模中已有 n 个光子,则由受激散射获得下一个散射光子的几率可由玻色-爱因斯坦统计确定:

$$w_{n+1} = (n+1)w_{sp} \quad (3)$$

因为散射光强度可写成 $I_s = h\nu_s n_s V_s / V$, 由式(1)、(2)、(3)可得散射光随路程 L 的变

收稿日期: 1979年7月21日。

化:

$$\frac{dI_s}{dx} = gI_p I_s \quad (4)$$

式中

$$g = N\lambda_s^2 \left(\frac{\partial \sigma}{\partial \Omega} \right) / n_s^2 \cdot \Delta w_{sp} h\nu_p$$

为受激喇曼的增益, N 是分子密度,

$$\Delta w_{sp} = 2\pi \Delta\nu_{sp}$$

考虑到介质的吸收系数 α , 则由式(4)可得:

$$I_s(L) = I_s(0) \exp[gI_p - \alpha] L_{eff} \quad (5)$$

L_{eff} 是光强 I_p 近似不变的传输距离, 可称相互作用长度。由式(5)可得在 L_{eff} 上获得受激散射光放大的阈值抽运强度:

$$I_p^{th} = \alpha/g \quad (6)$$

由式(5)可见, 在增益大于损耗的条件下, L_{eff} 越大, 受激散射光强就越大。对于非波导结构介质, 虽然可以通过聚焦增大强度, 但是相互作用长度却减少, 因此 $I_p L_{eff}$ 并不增大。对于高斯光束, 有:

$$I_p L_{eff} = \frac{P}{\lambda_p} \quad (7)$$

P ——抽运光的功率, λ_p ——抽运光的波长。

但当将光注入到光纤维时, 则可在纤维的整个长度上维持聚焦强度, 以满足阈值条件(6), 并有:

$$I_p L_{eff} = \frac{P}{\pi w_0^2} \frac{1 - e^{-\alpha L}}{\alpha} \quad (8)$$

w_0 ——近似为光纤的芯半径。

比较(7)、(8)可得, 波导比非波导结构中维持超阈值光强不变的相互作用长度要增大 m 倍,

$$m = \frac{\lambda}{\pi w_0^2} \frac{1 - e^{-\alpha L}}{\alpha} \quad (9)$$

例如, 对于芯径为 56 微米、损耗 $\alpha = 8 \times 10^{-6}$ 厘米⁻¹ 的光纤, 在可见光谱区的非线性增强约为 2.7×10^5 。因而在光纤中, 产生非线性光学现象所需的光功率要低 5 个数量级左右。

自 1972 年以来已有多篇文章报导了导光纤维中的受激喇曼散射^[1~4]。用锁模和 Q

开关 YAG:Nd 激光泵浦, 在单模纤维中已获得 6 级红外斯托克斯受激散射^[2, 3]; 用 Q 开关 YAG 倍频激光器, 在多模纤维中已测得 7 级受激斯托克斯散射^[4]。

最近, 我们采用电光 Q 开关、重复率为 5 次/秒和 10 次/秒、7 毫微秒脉宽、0.7 兆瓦的 YAG:Nd 倍频 532 毫微米激光泵浦; 用长为 480 米、折射率差 $\Delta n = 0.0099$ 、芯径 56 微米、包层外径约 125 微米、损耗为 8 分贝/千米 ($\lambda = 8200 \text{ \AA}$ 时)、掺杂 P_2O_5 的梯度型石英多模光纤, 获得了从 546 至 702 毫微米的十级斯托克斯受激散射。实验装置示于图 1。

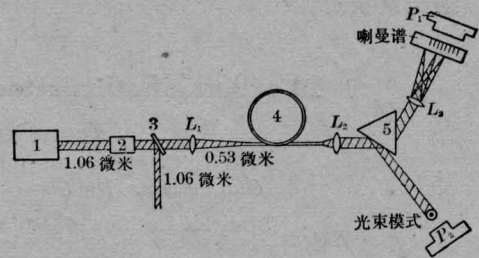


图 1 实验装置图

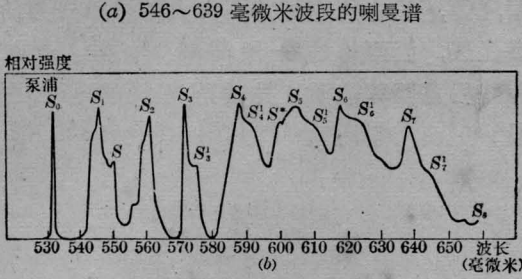
1—YAG:Nd 激光器; 2—KDP 倍频器; 3—双色分光镜; 4—光纤维; 5—ZF₇ 棱镜; L₁—聚焦透镜, $f=30$ 厘米; L₂—准直透镜, $f=3$ 厘米; L₃—柱透镜, $f=20$ 厘米

焦距为 30 厘米的透镜 L_1 将束角约 1 毫弧度以下的泵浦光注入光纤维, 耦合进光纤维的效率约 8%。从光纤出射的光, 经透镜 L_2 准直至色散棱镜, 再由焦距为 20 厘米的柱面透镜聚焦。用照相机摄得彩色多级受激喇曼谱和输出模式。

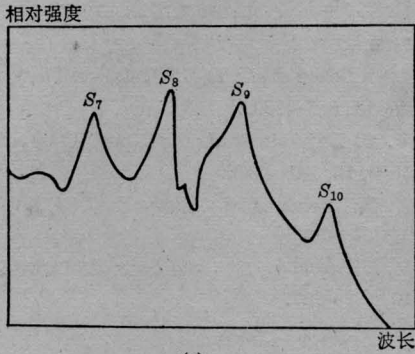
通过 31WI 型、线色散为 7.5 \AA/毫米 、工作波段为 200~600 毫微米的 1 米光栅光谱仪, 通过阶梯减光板摄得的 546~639 毫微米波段的受激喇曼光谱示于图 2(a); 用自动黑度计描出的黑度曲线示于图 2(b)。将彩色底片的红光部分, 用自动黑度计描出的 639~702 毫微米的黑度曲线示于图 2(c)。由于一级斯托克斯脉冲强烈地产生, 而每一个强斯托克斯分量又可以成为下一级斯托克斯的泵浦, 随之泵浦光将逐渐用尽。

表 1 各级受激喇曼散射的峰值波长

级	峰值波长 (毫微米)	
泵浦光	S_0	532
1	S_1	546
2	S_2	561
3	S_3	572
	S_3^1	576
4	S_4	588
	S_4^1	592
5	S^*	601
	S_5	606
6	S_5^1	609
	S_6	619
7	S_6^1	626
	S_7	639
8	S_7^1	645
	S_8	659
9	S_9	680
10	S_{10}	702



(b) 前 7 级的黑度曲线



(c) 后 4 级的黑度曲线

图 2

这样,多级斯托克斯分量的辐射,沿着光纤维逐级产生。

由图 2(b)、(c) 所示的各受激喇曼谱线的峰值波长列于表 1。根据表 1, 各级受激喇曼散射的频移关系示于图 3。从图 3 可知: 谱线 $S_1, S_2, S_3^1, S_4^1, S_5^1, S_6^1, S_7^1, S_8^1, S_9^1$ 和 S_{10}^1 为相应于频移 460~505 厘米⁻¹ 的 SiO₂ 的逐级激发谱; 此外, S_3, S_6, \dots 是频移为 1310~1330 厘米⁻¹ 的、掺杂 P₂O₅ 的逐级激发谱; 而 $S_4, S_5, S_7, S_8, \dots$ 为由 P₂O₅ 的斯托克斯受激散射、再次泵浦产生的 SiO₂ 的斯托克斯逐级激发谱。谱线 S^* 是由 S_3 和 S_1 混频产生的, S^* 与 S_3 的波数差和 S_3 与 S_1 的波数差相等, 为 832~844 厘米⁻¹。而 S_8, S_9, S_{10} 的峰值波长是由彩色底片参照棱镜的色散定出的。

除了上述的频移和受激斯托克斯散射特性外, 我们在实验中还可观察到如下一些情况:

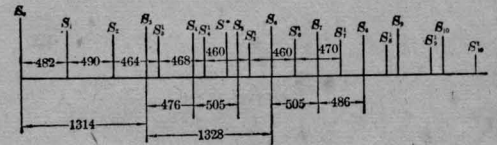


图 3 各级斯托克斯谱线间的波数差(厘米⁻¹)

1. 除了斯托克斯散射之外, 还存在反喇曼谱, 且与前几级喇曼强线对应的高频部分, 是明显的吸收线^[6]。

2. 产生受激散射的光强具有明显的阈值。能获得的受激斯托克斯散射的级数, 将依赖于注入到光纤中的泵浦光强度。通过减少注入到光纤的能量, 或破坏良好的耦合, 可以获得仅有泵浦光, 或仅有前几级斯托克斯分量的逐级减少。另外, 若保持泵浦光的强度, 能获得的受激斯托克斯散射的级数, 将依赖于光纤的长度。随着光纤长度的逐渐减

小, 受激斯托克斯散射的级数也逐渐减小。例如光纤长为 43 米时, 能获得 7 级; 减短到 28 米时, 仅能获得 3 级。

3. 在 P_2O_5 和 SiO_2 的受激喇曼谱线间, 存在着激烈的竞争。由于这种竞争, 使得谱线 S_2 的强度有变化。这是由于在光纤中, 相应于 SiO_2 和 P_2O_5 的一级斯托克斯频率上的受激喇曼散射的初始光子数是不可控制的^[6]。

4. 由于光纤中自相位调制的存在^[5], 以及斯托克斯谱线的逐级加宽, 加上 P_2O_5 和 SiO_2 的受激斯托克斯散射谱的交替迭加, 使得第四级以后的受激喇曼谱线显著加宽, 变成准连续。

我们的实验证明, 用多模光纤时, 也和单模光纤一样可以有效地获得多级受激喇曼散射, 并可进一步做成振荡器。若配合利用

激发源的调频, 可做成连续可调谐的受激辐射光源, 且它的变频范围大大超过单一染料激光器, 因而将是一种简单、有效、可靠地获得宽调频范围红外激光光源的有力手段。

参 考 文 献

- [1] R. H. Stolen *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1972, **20**, 62~64.
- [2] L. G. Cohen *et al.*; *Appl. Opt.*, 1977, **16**, 3136~3139.
- [3] L. G. Cohen *et al.*; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1978, **QE-14**, 855~860.
- [4] V. S. Bujykin *et al.*; *Opt. and Quant. Electr.*, 1979, **12**, 141~146.
- [5] R. H. Stolen *et al.*; *Phys. Rev. (A)*, 1978, **17**, 1448~1453.
- [6] V. S. Letokhov; *Opt. and Laser Technology*, 1978, **10**, 129~137.

告 读 者

“1980 国际激光会议”于 5 月分别在我国北京、上海两地举行, 本刊决定在《激光》杂志 5-6 期合刊上发表全部会议论文中、英文摘要汇编, 预定 6 月上旬发行, 合刊本售价 0.66 元, 特此通告。

编辑部