

光纤中受激四光子混频和受激喇曼散射的联合效应

沈 书 泊

郑州大学物理系, 郑州, 450052

1989 年 1 月 15 日收到

本文从掺杂多模石英光纤中同时记录到六对斯托克斯-反斯托克斯谱线, 并在 540—640 nm 的光谱范围内获得了受激四光子混频和受激喇曼散射联合产生的连续光谱带。在比较 20m 和 200 m 光纤不同光谱特征的基础上, 详细分析了受激四光子混频和受激喇曼散射谱线间的竞争和转化过程。

PACC: 4281; 4265; 3380

一、引 言

受激四光子混频 (SFPM) 和受激喇曼散射 (SRS) 是光纤在强光传输过程中, 由三次非线性极化率 χ_3 的实部 χ_3' 和虚部 χ_3'' 引起的两种不同机制的非线性效应。这两种效应的共同特点是能把某频率的相干泵浦光转换成新的不同频率相干光。由于光纤中产生 SFPM 和 SRS 的阈值功率比块状材料的阈值功率低得多, 普遍认为, 光纤中的 SFPM 和 SRS 效应是实现激光变频的一种有效手段^[1]。与 SRS 比较, SFPM 的优点是, 既可进行频率下转换, 又可进行频率上转换, 但它的缺点是要求苛刻的位相匹配条件, 且较大频移的相干长度较短。所以, 在实验上产生 SFPM 的斯托克斯-反斯托克斯 (S-AS) 对较为困难, 出现多对 S-AS 尤为困难。迄今为止, 在以往作过的有关实验中, 每次只能同时观察到一对、两对, 最多三对 S-AS 谱线^[2]。我们经过大量重复实验, 同时记录到六对 S-AS 谱线。特别使我们感兴趣的是, SFPM 的斯托克斯模又作为新的“泵浦源”激发产生了 SRS 的多级斯托克斯谱线, 它们与原泵浦源直接产生的 SRS 多级谱线搭接在一起, 以致在 540—640 nm 的波长范围内形成了一条连续谱带。

本文的主要目的在于, 根据我们获得的实验结果, 分析研究 SFPM 多对 S-AS 谱线产生的机制, 以及在我们研究的光谱范围内不同长度光纤 SFPM 和 SRS 之间的相互竞争和转化过程, 并分析 SFPM 和 SRS 联合产生的连续谱带形成原因。

二、实验装置与实验结果

实验装置如图 1 所示。实验中用调 Q 的 Nd: YAG 激光器的倍频光 532 nm 作为泵

浦源, 泵浦光通过滤光片滤去 $1.06 \mu\text{m}$ 后, 用 10 倍显微物镜耦合到长度分别为 20 m 和 200 m 的光纤, 从光纤出射的输出光束再通过 10 倍显微物镜入射到 31 WII 型两米光栅摄谱仪摄谱. 532 nm 绿光能量为 5 mJ, 脉冲宽度约为 20 ns. 实验中所用的光纤为阶跃型常规单模光纤, 纤芯材料为掺杂 ($\text{GeO}_2 + \text{P}_2\text{O}_5$) 石英, 芯径为 $9.44 \mu\text{m}$, 数值孔径为 0.13, 截止波长为 $1.17 \mu\text{m}$.

实验结果如图 2 所示. 图 2(a) 和 (b) 分别为 20 m 和 200 m 光纤所拍摄的光谱照片及相应的黑度曲线.

由图 2 可以看出, SFPM 和 SRS 谱线的特征截然不同. SFPM 谱线成对出现, 其线宽较窄, 大约与 532 nm 泵浦光线宽相当. SFPM 谱线对分别为 $S^1\text{-AS}^1$,

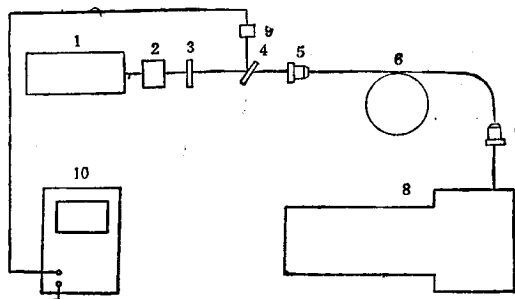


图 1 实验装置

1 为 Nd:YAG 激光器; 2 为 LiNbO_3 倍频晶体; 3 为滤光片; 4 为分束器; 5, 7 为耦合透镜; 6 为光纤; 8 为两米平面光栅摄谱仪; 9 为光电探测器; 10 为脉冲示波器

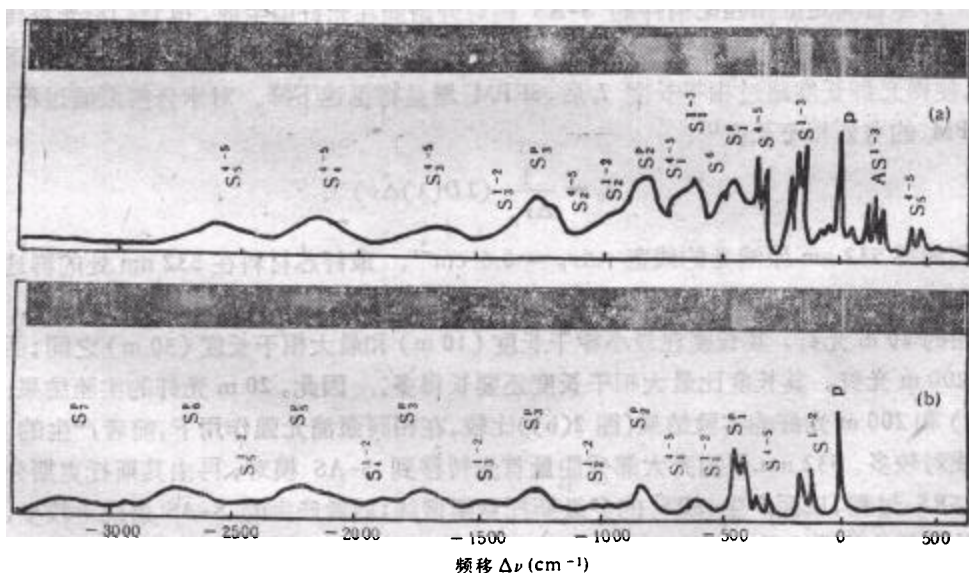


图 2 光纤输出光谱照片及其黑度曲线

(a) 为 20 m 光纤; (b) 为 200 m 光纤

$S^2\text{-AS}^2$, $S^3\text{-AS}^3$, $S^4\text{-AS}^4$, $S^5\text{-AS}^5$ 和 $S^6\text{-AS}^6$; SRS 谱线仅有斯托克斯分量, 其线宽较宽, 一级斯托克斯线宽约为 300 cm^{-1} . 532 nm 泵浦源直接激发产生的 SRS 谱线为 S_1^1 , S_2^1 , S_3^1 , S_4^1 , S_5^1 , S_6^1 和 S_7^1 . 除此而外, 照片中还出现了由 SFPM 斯托克斯分量作为新频率的“泵浦源”激发产生的 SRS 多级斯托克斯谱线.

三、结果分析

1. 在 SFPM 过程中,欲使两个泵浦光子 ω_{p1} 和 ω_{p2} 有效地转换成斯托克斯光子 ω 和反斯托克斯光子 ω_{AS} , 必须满足位相匹配条件: $\Delta k = k_{p1} + k_{p2} - k_s - k_{AS} = 0$. 若仅考虑纤芯的材料色散,则四个作用波的波矢失配

$$\Delta k_m = 2n_p\omega_p/c - n_s\omega_s/c - n_{AS}\omega_{AS}/c \quad (1)$$

不等于零. 但是,相同频率的光子在多模光纤中有不同的波导模,而不同的波导模有不同的传播常数. 根据前面给出的光纤参数,我们可以算出,在泵浦波长为 532 nm 的情况下,光纤可能传输的线偏振模可达近百个. 因而,对光纤色散的贡献,除纤芯材料本身的色散外,还应有波导模间色散的贡献 Δk_w . 这样,就能够在光纤中实现

$$\Delta k = \Delta k_m + \Delta k_w = 0,$$

即 $\Delta k_w = -\Delta k_m$. 我们在实验中观察到的六对 S-AS 谱线同时出现,说明它们均满足了位相匹配条件. 而且,由观察到的 S-AS 模对的模样分布和频移大小可以断定,它们的位相匹配条件与分割泵浦过程有关^[3]. 由分割泵浦过程激发的模对,其斯托克斯模分布在较高的级次,而反斯托克斯模则分布在较低的级次. 不同模的结合则对应不同的频移.

2. 尽管满足位相匹配条件的 S-AS 模对开始能在光纤中生成,但它们沿光纤传播过程中,由于光纤本身不均匀性引起的 Δk 变化以及泵浦波在自相位调制作用下的谱线增宽,使得光纤长度超过相干长度 l_c 后,SFPM 增益将迅速下降. 对于分割泵浦过程而言,SFPM 的有效相干长度^[3]

$$l_c = \frac{1}{\Delta\nu_p} (\lambda D(\lambda)\Delta\nu)^{-1}. \quad (2)$$

我们测得 532 nm 泵浦光的线宽 $\Delta\nu_p = 0.6 \text{ cm}^{-1}$, 取纤芯材料在 532 nm 处的群速色散 $D(\lambda) \approx 0.066$, 在频移 $\Delta\nu = 150-500 \text{ cm}^{-1}$ 的情况下,相干长度 $l_c \approx 10-30 \text{ m}$. 我们选用的 20 m 光纤,其长度在最小相干长度(10 m)和最大相干长度(30 m)之间;而选用的 200 m 光纤,其长度比最大相干长度还要长得多. 因此,20 m 光纤的实验结果(图 2(a))和 200 m 光纤的实验结果(图 2(b))比较,在相同泵浦光强作用下,前者产生的 S-AS 谱线对较多,532 nm 泵浦光大部分能量首先转移到 S-AS 模对,再由其斯托克斯分量激发 SRS 过程,从而产生 SRS 的多级斯托克斯谱线;后者产生的 S-AS 谱线对较少,泵浦光的大部分能量直接转移到 SRS 的斯托克斯各级分量.

3. 我们在实验中观察到的所有 S-AS 的频移大小均在 150 cm^{-1} 和 500 cm^{-1} 之间. 显然,它们的位置基本上处于掺杂石英光纤的喇曼增益带宽之内, SFPM 增益受到 SRS 增益的强烈影响. 由于 SRS 的斯托克斯增益为正,导致 SFPM 的斯托克斯有效增益比纯 SFPM 的斯托克斯增益要大;而 SRS 的反斯托克斯增益为负,导致 SFPM 的反斯托克斯有效增益比纯 SFPM 的反斯托克斯增益要小. 正因为 SFPM 的斯托克斯增益受到 SRS 效应的增强,所以,尽管 200 m 光纤的长度比最长的相干长度还要长得多,但仍然在它的光谱照上看到四条 SFPM 的 S 谱线. 同样,因为 SFPM 的反斯托克斯增益受

到 SRS 效应的减弱,所以,在 20 m 光纤的光谱照片中, AS 谱线比 S 谱线弱得多;而在 200 m 光纤的光谱中,竟看不到一条 AS 谱线。此外,由图 2 还可以看出,在所有能够观察到的 S-AS 谱线对中,不同的 S 谱线有的较强,有的则较弱。产生这种现象的一个重要原因是,这些不同频移的 S 谱线对应不同的相干长度。一般说来,相干长度长的模对,如 S^1-AS^1 , S^2-AS^2 , 相应的 S 谱线较强,在 20 m 和 200 m 光纤的输出中均能观察到。正因为 S^{1-2} 谱线较强,在 200 m 光纤中竟激起了高达 5 级 SRS 的 S 谱线;而相干长度较短的模对,如 S^3-AS^3 和 S^6-AS^6 , 相应的 S^3 和 S^6 强度较低,在 200 m 光纤的输出中就观察不到 S^3 和 S^6 谱线。但一个值得注意的例外是, S^4-AS^4 和 S^5-AS^5 对应的相干长度尽管比 S^3-AS^3 的短,由于它们的频移位置靠近喇曼增益的峰值,喇曼共振效应影响较大,所以,在 20 m 和 200 m 光纤的输出中皆能观察到 S^4 和 S^5 谱线。对于 20 m 光纤而言, S^4 和 S^5 的纯 SFPM 增益本来就比 200 m 的增益高得多,再受到较强的喇曼共振效应增强,以致由它们激发产生的 SRS 谱线比 S^{1-2} 激发产生的 SRS 谱线的级次还要高得多。

4. 从图 2 不难看出,斯托克斯光谱区域之所以能形成这样宽连续谱带,原因在于能在光纤中产生数量较多的 S-AS 模对,而它们的斯托克斯分量又激发产生的 SRS 多级斯托克斯谱线,又正好填补了 532 nm 泵浦光直接激发产生的 SRS 多级斯托克斯光谱的空白区域。

四、结 论

在多模掺杂石英光纤中,频移在 $150-500\text{ cm}^{-1}$ 范围内的 SFPM 效应受到 SRS 效应的强烈影响,导致 SFPM 的斯托克斯有效增益增大,使许多 SFPM 的 S 谱线能在长度比其相干长度长得多的光纤中出现。这样,对于 SFPM 和 SRS 增益均较高而各种参数又较为合适的光纤,利用适当的泵浦波长和耦合条件,就可能在较长的光纤中喇曼增益带宽范围内同时激起数量较多的 SFPM 的斯托克斯模;另一方面,只要泵浦光足够强, SFPM 的斯托克斯模又可作为新频率的“泵浦源”激发 SRS 的联级斯托克斯过程。SFPM 和 SRS 联合效应产生的光谱与原泵浦光直接产生的 SRS 多级斯托克斯光谱叠加在一起,就能在较宽的光谱范围内获得较为理想的连续光谱带。这对实现光学宽频带放大器和光学宽频带可调谐振荡器有重要应用价值。

工作中曾得到肖铁臣、袁忠宇、袁斌、张骏和许月娥等的具体帮助,谨表谢意。

- [1] D. Cotter, *Optical and Quantum Electronics*, 19(1987), 1.
- [2] 王奇、杨天龙、沈文达,中国激光, 15(1988), 30.
- [3] R. H. Stolen and J. E. Bjorkholm, *IEEE J. Quant. Electr.*, QE-18 (1982), 1062.

JOINT EFFECT OF STIMULATED FOUR PHOTON MIXING AND STIMULATED RAMAN SCATTERING IN OPTICAL FIBER

SHEN SHU-PO

Department of Physics, Zhengzhou University, Zhengzhou, 450052

(Received 15 January 1989)

ABSTRACT

Six pairs of Stokes-anti-Stokes lines of stimulated four photon mixing in a multimode fiber with $\text{GeO}_2 + \text{P}_2\text{O}_5$ doped silica core are simultaneously recorded. A continuum band generated jointly by SFPM and stimulated Raman scattering is obtained in the spectral range 540—640 nm. On the basis of two different experiment results for 20 m and 200 m fiber, the mechanism of competition and transformation between SFPM and SRS are analyzed in some detail.

PACC: 4281; 4265; 3380