

光导纤维受激喇曼散射

刘保良

(物理教研室)

提 要: 本篇论文描述了多模光纤受激喇曼散射的获得的实验研究, 并对500 μ m光纤摄取了11级受激斯托克斯线, 着重讨论了受激喇曼散射的产生和谱线的性质。

关键词: 散射, 相互作用长度, 阈值

由于激光具有亮度高、单色性好和高度偏振等优点, 在各个领域发展很快。激光在介质中产生的非线性效应——受激喇曼散射, 对化工工业、通讯工业有很高的应用价值, 它可以扩大相干光辐射的物理机制, 丰富受激发射的波长。

1 受激喇曼散射

当高强度激光入射介质时, 产生非线性电极化效应, 不仅在介质中存在原入射光谱, 同时还有偏高和偏低的频谱, 这些谱线的频移有一定规律, 即频移与组成介质的分子结构和运动状态有关, 与入射光无关。这种效应称为受激喇曼散射; 偏高的频谱为反斯托克斯线, 偏低频谱为斯托克斯线^[1]。

一般情况下粒子数按能级分布的玻尔兹曼规律有 $N_a > N_b$ 。即斯托克斯线的增益大于反斯托克斯线的增益。

对多模光纤而言, 散射几率与激光波的强度成正比^[2]

$$W_{\omega} = \frac{d\delta}{d\Omega} \cdot \frac{I_0}{h\nu_0} M^{-1} \quad (1)$$

其中 W_{ω} 是自发散射几率, $\frac{d\delta}{d\Omega}$ 是激光强度 I_0 和频率 ν_0 总的散射截面, M 为模式数目。

受激喇曼散射强度与激发光强度, 在介质中相互作用长度、线性光学吸收系数等参数成指数关系。可表示为^[3]

$$I_{s1}(l) = I_{s1}(0) \exp[(g_{s1} I_0 - \alpha) l]$$

式中 $I_{s1}(l)$ 为在介质中 l 距离上第一阶斯托克斯喇曼散射光的强度, g_{s1} 为增益系数, I_0 为激发光强度, l 为光纤长度(相互作用长度), α 为光纤的线性吸收系数。

由此可得产生受激喇曼散射需要的泵浦光的阈值

$$I_0^{th} = \alpha / g_0$$

对在无波导介质中传播的高斯光束有

$$I_0 l = p / \lambda_0$$

p 为泵浦光功率, λ_0 为其波长。所以用聚光镜将激光耦合到光纤中时光束强度能在光纤中持续很久, 并使满足阈值条件。

对高阶受激喇曼散射的光强可由下列一组方程描述^[3]

$$dI_0/dZ = -g_0 I_{s1} I_0 - \alpha I_0$$

$$dI_{s1}/dZ = g_{s1} (I_{s1} I_0 - I_{s2} I_{s1}) - \alpha I_{s1}$$

$$dI_{s2}/dZ = g_{s2} (I_{s2} I_{s1} - I_{s3} I_{s2}) - \alpha I_{s2}$$

其中激光是沿 Z 方向传播, $g_{s1} = g_0 \omega_{s1} / \omega_0$ 。

受激喇曼散射是激光的一种现象, 具有激光的特点, 一般说来产生散射的工作物质愈长其增益愈大。受激喇曼散射也有近似现象, 当 L 增长时阈值降低, 高阶受激喇曼散射谱将出现。为此实验选用500m长光纤作为散射介质, 并摄取11级斯托克斯线。

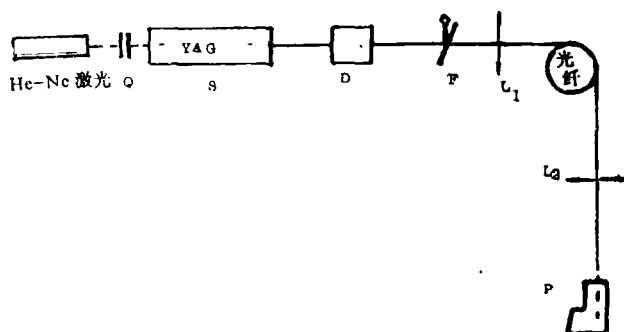
2 实验装置与结果

实验是由染料Q开关YAG激光器为泵浦光源, 并由LiNbO₃晶体腔外倍频后 L_1 耦合入射光纤, 出射光经 L_2 会聚进摄谱仪P。He—Ne激光器用于调节和准直光路。见图一

所用光纤是多模自聚焦光波导, 其折射率沿轴向分布均匀, 沿径向逐渐缩小与半径平

方近似成 $\eta = \eta' (1 - \frac{r^2}{R_0^2} \varphi)$ 的关系。 η' 是芯轴折射率, φ 为折射率变化率, R_0 为芯半

径。因光纤具有自聚焦特性, 故用此光纤作介质易于观察受激喇曼散射和其它非线性现象。



摄谱仪P的主要指标:

范围: 3650 Å ~ 6500 Å

线色散: 70 Å/mm (本实验)

狭缝宽: 0.015mm (本实验)

S为JGM—1型染料Q开关激光器, 脉宽15ns能量200mJ D为LiNbO₃倍频器, F为红外滤光片

L_1 为10×数值孔径0.125的显微物镜

L_2 为聚光透镜, P为GBO小型摄谱仪

图1 实验原理图

光纤是P—S₁—G₂三元光纤数根如下

表1

	500M掺锗纤
芯径	57μm
Δn	1%
皮径	125 ± 3μ
孔径	$\mu = 0.21$
损耗	3db/km
折射率	梯度型

表2

分子	峰值频移	相对散射截面
SiO ₂	440cm ⁻¹	1.0
G ₂ O ₂	420cm ⁻¹	9.2
P ₂ O ₅	640cm ⁻¹ 第一振动能 1390cm ⁻¹ 第二振动能	5.7 3.5

首先对500m光纤的受激喇曼斯托克斯线进行观察,并摄取了11级斯托克斯线。图2

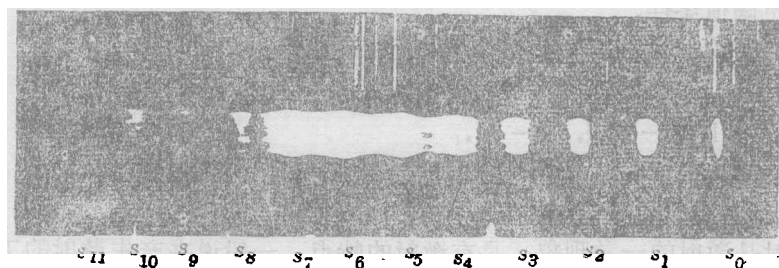


图2 11级受激喇曼散线

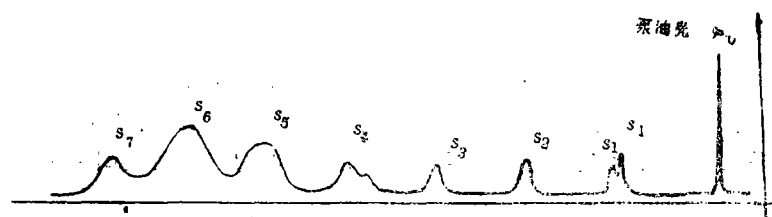


图3a 强度分布曲线

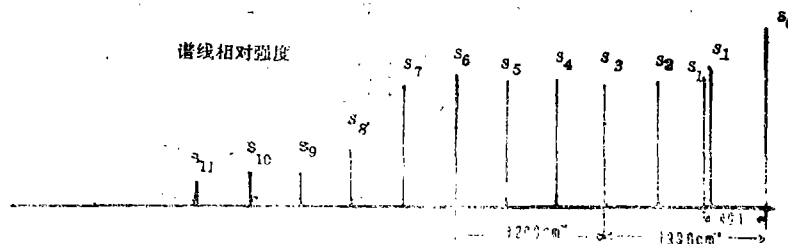


图3b 相对强度分布

用数字微型黑度计根据底片感光描绘的光强度分布曲线。(见图3a)相对强度分布(见图3b)

当第一级斯托克斯线强度超越一定值时,原泵光变弱形成第一强斯托克斯分量可认为是下一次的斯托克斯线的泵浦源,这样沿着光纤产生出斯托克斯分量的多级辐射,因此多级受激喇曼谱线的能量是逐级减小的。由图四可看出各级斯托克斯线并不是逐级减小,造成原因是由于光纤本身有其喇曼增益谱和损耗谱,并还有摄象底片的感光特性的影响。

受激喇曼散射的不同频移关系*单位: cm^{-1}

S_0	S_1/S_0	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8	S_9	S_{10}	S_{11}
波数	447/491	449	434	434	423	432	445	404	504	466	335

| $\leftarrow 1330\text{cm}^{-1} \rightarrow$ | $\leftarrow 1289\text{cm}^{-1} \rightarrow$ |

由于谱线较宽(最宽处达 250cm^{-1})测量时是以谱线中心为准。每条宽谱有可能是几级线重合而成,因仪器精度未能分清。

由频移关系与表二对比测定 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 、 S_5 、 S_6 、 S_7 、 S_8 、 S_9 、 S_{10} 、 S_{11} 为 GeO_2 分子的受激振动能级的斯托克斯线。符合 420cm^{-1} 的频移。 S_3 、 S_6 可能是 P_2O_5 振动能级的第一、第二级。第四级和第五级斯托克斯线中间有许多线。 P_2O_5 的第二级可能在其中,其它谱线是前几级的混频所致($W_0 + W_{s1} = W^* + W'$)。从频移上看 S_3 是由 GeO_2 的第三级斯托克斯线与 P_2O_5 的第一级重合而成。 S_{11}' 是 SiO_2 的振动能级产生。 SiO_2 的散射截面比 GeO_2 的小^[4]、相对阈值则要比 GeO_2 大,所以 SiO_2 的斯托克斯线的强度小,不易产生下级频线, SiO_2 的第二级斯托克斯线一般不出现。

3 结束语

11级喇曼谱线在受激喇曼散射中是较高的,谱线的产生与许多因素有关。本实验中进行了500m, 350m, 30m长光纤受激喇曼散射谱线的比较,在30m光纤中出现有连续谱和反斯托克斯线,这与500m长光纤受激散射情况不同。在长光纤中连续谱传播被介质所吸收(损耗),当泵光能量转化为喇曼谱时,若能量比散射谱阈值低时有一部分能量转化为连续谱并在光纤中传播,光纤的增长光不断衰减,致使在观察长光纤受激喇曼散射时无法记录连续谱。

几点说明:

- (1) 由于摄谱仪和感光材料的限制,只拍摄了11级,否则将会有更高的谱线。
- (2) 光纤与泵光的耦合很重要,在耦合不好时,很容易在高能激光下把光纤头击断。
- (3) 可观察到很强的自聚焦现象,在光纤中有许多处被自聚焦击坏。
- (4) 直接用红外光(去下倍频器)1.06 μm 泵光入射短光纤,同样产生了连续谱。

参 考 文 献

- [1] “激光物理”编写组:《激光物理》,上海人民出版社:1975;第七章,强光光学效应。
- [2] Su Hai—Zheng and Yang Tian—Long, tg “Stimulated Raman scattering in an optical fiber”, 《Applied Physics》24(1981)P302—306
- [3] 郑顺旋,《激光喇曼光谱学》上海科技出版社,1985, P144—178
- [4] A. Penzkofer, WeKaiser, 《Optical and Qucmtum Electronics》9(1977)P315—349

Stimulated Raman Scattering in an Optical Fiber

Liu Bao-liang

(Physics teaching group)

Abstract: The purpose of this essay is to give a general description of the experimenting result of stimulated Raman scattering in an optical fiber, to gain 11 grades stimulated Stokes line in the length of 500M optical fiber, and to discuss the produce of stimulated Raman scattering and the quality of spectrum.

Key words: Scattering, Interaction Length, Threshold