

一种新型喇曼增益介质的受激喇曼散射*

王 兆 民

(长春光学精密机械学院光学物理系)

提 要

本文提出了一种测试新的喇曼增益介质——被扩散进石英光纤中氮——的受激喇曼散射的方法。文中讨论了阈值条件,谱线宽度与泵浦功率间关系。观测了在低于单模光纤截止波长时的输出模式。实验中还观察到微弱的氮分子和石英分子间的耦合模式。

在光纤中扩散进某种气体可以产生一种新型的喇曼增益介质^[1~3],它不但具有光纤的优点——低损耗、喇曼作用程长、可控性好,且具备被扩散进气体的等优点——如可以选择较大的喇曼位移量等;它也可作为光放大介质用于光通讯。本文给出了在单模石英光纤中,扩散进 N_2 气体所产生的受激喇曼散射实验结果。

一、实验装置及结果

1. 渗氮光纤的制作

实验中所使用的光纤**截止波长为 $1.1\mu m$,芯径为 $\phi 5\mu m$,成分为 $SiO_2 + GeO_2$,包层径为 $\phi 125\mu m$ 、成分为 SiO_2 。折射率差 $\Delta n = 0.6\%$,运输损耗为 $0.6 dB/km (\lambda = 1.3\mu m)$ 。将长度 $L = 20 m$ 左右的光纤密封放置在自通过(autoclave)炉中,在压力为 $210 kg/km^2$ 、温度为 $210^\circ C$ 的条件下,持续一周左右时间以实现 N_2 向光纤中扩散。

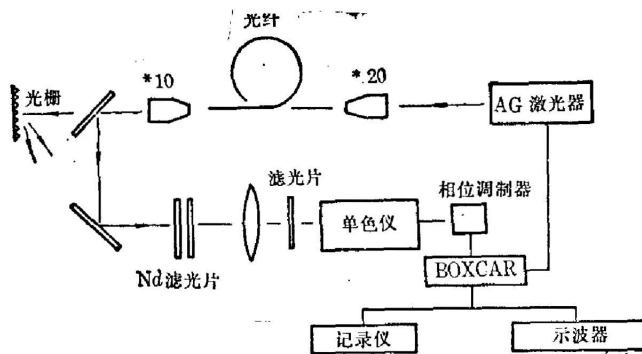


图 1 被扩散进石英光纤中 N_2 的受激喇曼谱测试装置

Fig. 1 Set up of SRS measurement of N_2 diffused-silica optical fiber

2. 实验装置

被扩散进石英光纤中 N_2 的受激喇曼谱测试装置如图1所示。以YAG激光的二次谐波 $\lambda = 532.0 nm$ 作为泵浦光源。激光器的运转特性为:脉冲光重复频率为 $75 pps$,调Q状态,脉冲宽度为 $100 ns$,在光纤的出射和入射端分别用10倍和20倍显微镜聚焦。为了很好除去很强的泵浦光和前几级 SiO_2 本身的受激喇曼谱的影响,在单色

收稿日期:1984年9月11日;收到修改稿日期:1985年1月22日

* 本文曾在1984年日本全国应用物理学会(春)上宣讲。

** 日本藤仓电线株式会社提供的阶跃型单模石英光纤。

仪前加了干涉光学滤光片。用 R105 型光电倍增管作为探测器把信号检出, 经 Boxcar 放大, 最后由记录仪给出结果。

3. 受激喇曼谱

测试是在把光纤从扩散炉中取出后 2 小时内进行, 图 2 给出了渗氮和未经渗氮石英光纤受激喇曼光谱。可以明显看出对于渗氮的石英光纤, 在 2460 cm^{-1} 处出现了一级 N_2 的受激喇曼谱, 和气体状态 N_2 的喇曼位移量相比 (2331 cm^{-1}) 略移向长波端。这是由于 N_2 分子和 Si-O 振动带的相互作用, 使 N-N 振动能级改变所致。并且使其线宽比气体 N_2 喇曼线宽增宽了 2~3 个数量级, 结果大大降低了喇曼增益系数。

此外, 值得注意的是在 2906 cm^{-1} 处呈现了一个微弱的峰值。可以认为这是被扩散进 N_2 和石英分子 Si-O 振动带 (446 cm^{-1}) 的结合模式。

4. 传输模式

本实验中无论泵浦光还是信号光波长都低于单模光纤的截止波长, 因此在可见光域存在若干个输出模式。

光纤的特征频率为^[4]

$$\nu = 2\pi r n_1 \sqrt{2\Delta} / \lambda,$$

$$\Delta = (n_1 - n_2) / n_1.$$

其中

把本实验所用光纤的各参量及喇曼光波长代入上式, 可求出特征频率为 $\nu = 3$ 。而对于阶跃型光纤其传输模式总数近似为 $N \approx \nu^2 / 2 \approx 4$ 。实验证明, 光纤的传输模式与泵浦光相对

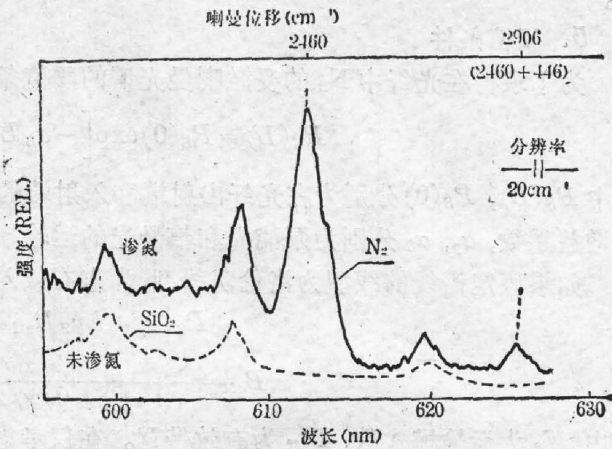


图 2 渗氮和未渗氮石英光纤的受激喇曼光谱
Fig. 2 SRS spectra of silica fibers diffused and not diffused with N_2

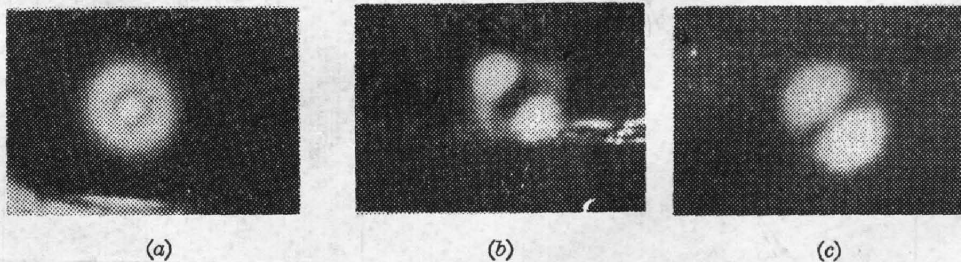


图 3 (a) 低于光纤中 N_2 的受激喇曼光谱阈值功率时, 光纤中的传输模式;
(b)、(c) 被扩散进光纤中 N_2 的受激拉曼光谱的传输模式

Fig. 3 (a) Transmission mode in optical fiber with power lower than the threshold of SRS of N_2 in the fiber;
(b) and (c) Transmission modes of SRS spectra of N_2 diffused in optical fiber

于光纤的入射角, 光纤长度及弯曲状态等参量有关, 图 3 给出了几个在光纤中运输的模式照片。

5. 阈值条件

为了求得在光纤中 N_2 的受激喇曼光谱的阈值条件, 考虑在单模运输时应有

$$P_s(L) = P_s(0) \exp \left[-\alpha_s L + \frac{\gamma S_p(0)}{A \alpha_p} \right],$$

式中 $P_s(L)$, $P_s(0)$ 分别为在光纤出射端和入射端的信号功率, $S_p(0)$ 为泵浦光功率, γ 为喇曼增益系数, α_p , α_s 分别为泵浦光和信号光的运输损耗系数。

如果假定谱线的线型为洛伦茨线型, 那末有效入射斯托克斯功率可写成

$$P_s(0) = h \nu_s B_{\text{eff}} N_s,$$

$$B_{\text{eff}} = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \frac{\Delta \nu}{[S_p(0) \gamma / A \alpha_p]^{1/2}},$$

式中 N_s 为运输模式数, B_{eff} 为有效带宽。在仅考虑一个输出模式(即 $N_s=1$)时, 且近似取 $\alpha_p = \alpha_s$, 那么在阈值条件下有

$$\frac{\sqrt{\pi}}{2} (h \nu_s) \left(\frac{\gamma}{A \alpha_p} \right) \Delta \nu = \left(\frac{\gamma P_{Th}}{A \alpha_p} \right)^{3/2} \exp \left(-\frac{\gamma P_{Th}}{A \alpha_p} \right),$$

式中 $\Delta \nu$ 为线宽, 采用 R. G. Smith 的近似公式^[5], 上式简化为

$$P_{Th} = 16 A \alpha_p / \gamma.$$

本实验中所采用的各数据为 $A = 1.3 \text{ s} = 3 \times 10^{-7} \text{ cm}^3$, $\alpha_p = 7 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$ ($\lambda_p = 532.0 \text{ nm}$), $\gamma = 1.5 \times 10^{-13} \text{ cm/W}$ 。则可求出其阈值的峰值功率的计算值为 $P_k = 2.24 \text{ kW}$ 。考虑到 YAG 激光器运输特性, 可计算出相当于此峰值功率的平均功率为 $P_{av} = 17 \text{ mW}$ 。图 4 为实验给出的阈值曲线, 从图 4 求得阈值功率约为 $P_{av} = 23.5 \text{ mW}$, 即峰值功率为 $P_k = 3.1 \text{ kW}$ 。

显然, 实验值比计算值略高, 这可能是由于在可见光阈很难获得单模输出以及不可避免的耦合损失等因素引起的。

图 5 为实验获得的泵浦光平均功率和线宽间关系曲线, 从图中可看出谱线的半值宽度

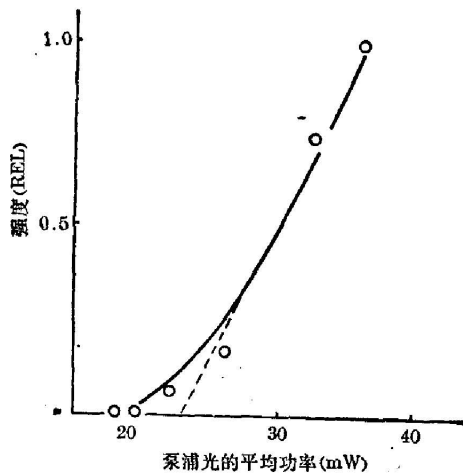


图 4 被扩散 N_2 的受激拉曼谱阈值曲线
Fig. 4 Threshold curve of SRS spectra of diffused N_2

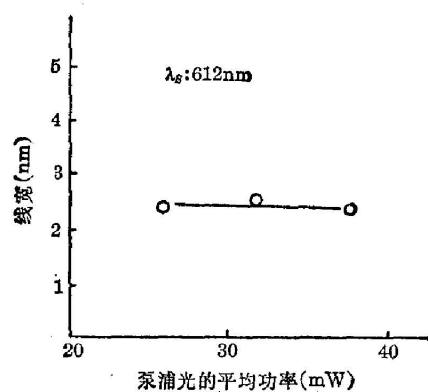


图 5 平均泵浦功率和 N_2 的一级喇曼线宽关系曲线
Fig. 5 Average pumping power versus first-order Raman linewidth of N_2

几乎不随泵浦光功率而变。

二、结 论

扩散进石英光纤中 N_2 的受激喇曼散射光谱的性质与扩散条件及光纤介质有关。其喇曼线与气态 N_2 分子喇曼线相近性说明了氮是以分子状态存在于 SiO_2 中, 且彼此耦合较弱, 实验指出随泵浦功率的增强, SiO_2 本身的受激喇曼谱逐渐变成连续谱, 测试更高级的 N_2 的斯托克斯线是比较困难的。

此外, 实验也证明了当光纤以高温高压状态恢复到室温时, 扩散进的 N_2 要部分析出, N_2 在光纤中密度变小, 从而斯托克斯线强度也变弱, 变种析出与扩散的气体种类, 所使用光纤成分及气体扩散条件有关。

本实验是在日本东北大学稻场文男教授、伊藤弘昌博士指导下完成的, 坂上登先生提供了扩散 N_2 的光学纤维, 作者深表感谢。

参 考 文 献

- [1] J. Stone, A. R. Charaplyvy *et al.*; *Opt. Lett.*, 1982, **7**, No. 6 (Jun), 297.
- [2] 王坂上, 伊藤稻场; 昭和 58 年全国電子通信学会講演論文集, **4-QE**, 975.
- [3] A. R. Charaplyvy, J. Stone *et al.*; *Opt. Lett.*, 1983, **8**, No. 7 (Jul), 415.
- [4] 根本俊雄; 《光ろいす・アイテアの基礎》, (オーム社, 1979).
- [5] R. G. Smith; *Appl. Opt.*, 1972, **11**, No. 11 (Nov), 2489.

Stimulated Raman scattering of a new Raman gain medium— N_2 -in-silica fiber

WANG ZHAOMIN

(Department of Optical Physics, College of Optical and Fine Mechanics, Changchun)

(Received 11 September 1984; revised 22 January 1985)

Abstract

In the paper, a measuring method of the stimulated Raman scattering (SRS) of diffused N_2 in solid silica optical fiber is proposed. It is a new type of Raman gain medium—gas in glass. The dependence of threshold and linewidth of SRS on the power of pump light is discussed. The output mode is measured when the transmission wavelength in the optical fiber is lower than the cut-off wavelength of the single mode silica optical fiber. In addition a weak coupling mode between N_2 and SiO_2 molecules is observed in the experiment.