

亚微米直径光纤的非线性特性研究*

饶 丰 叶志清 刘鸿娟

(江西师范大学光电子重点实验室,南昌 330022)

摘 要 用电磁场的严格解分析了亚微米直径光纤的非线性系数,发现光纤直径在 700 nm 左右(亚微米量级)非线性系数较大,喇曼阈值较小,喇曼增益谱线较多;受激喇曼散射特性的分析表明,由于直径小,光纤在较小的泵浦光功率作用下能量密度就很大,因此很容易观察到受激喇曼散射. 实验结果表明,理论分析与实验结果吻合得很好.

关键词 非线性光学;亚微米直径光纤;微光通信

中图分类号 O431.1

文献标识码 A

文章编号 1004-4213(2007)01-0059-4

0 引言

随着现代光通信和光传感的不断发展,对光学器件工作性能,集成度和能量消耗等要求越来越高^[1-3],传统光纤难以满足这些要求,而亚微米直径光纤因为显著的近场光学效应将引起一系列在宏观光学中难以出现的有趣现象,这将为新型微光通信和光传感器件提供崭新的设计思路.

亚微米直径光纤能用于制作低损耗、高性能的光纤耦合器^[4],应用于光纤标准分路器、波分复用、宽带耦合器、衰减器、滤波器、环形器,无源器件,或者用于光纤通信系统的其它全光纤元器件. 和普通光纤不一样,亚微米直径光纤的一个重要的特性就是它能弯曲到非常小的曲率半径(1 mm 甚至更小)同时具有小的弯曲损耗^[5-6]和更高的非线性系数,因此可以用作集成光学上具有潜在应用的微型全光纤器件.

为了用较低的光功率就能激发明显的受激喇曼散射,通过减小光纤的直径,让光积聚在直径很小的光纤内,这样,光纤内的能流密度就能用较小的入射光功率就达到很大,达到喇曼阈值,就能发生明显的喇曼散射.

1 非线性系数

随着光纤通信容量不断的提高,非线性光学的重要性日益突出. 在此将研究非线性光学中的一个重要参量-非线性系数 γ ^[7].

$$\gamma = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{\int_{s_1} n_2 S_z^2 ds}{(\int_{s_2} S_z ds)^2} \quad (1)$$

式中: s_1 表示纤芯面积, s_2 表示纤芯面积加包层面积, S_z 表示坡印廷矢量, n_2 表示芯层折射率. 计算

结果如图 1.

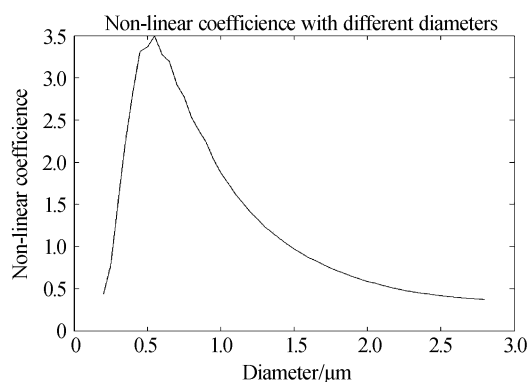


图 1 不同直径的非线性系数图

Fig. 1 Nonlinear coefficient with different diameter

从图中可以看出亚微米直径光纤的非线性系数能够比较大,当光纤直径为 700 nm 附近时,光纤拥有最大的非线性系数.

2 受激喇曼散射

2.1 喇曼增益谱

考虑一束频率为 ω_p 的连续光波在光纤中的传播,如果一束频率为 ω_s 的探测波在光纤的输入端与泵浦光同时输入,只要频差 $\Omega = \omega_p - \omega_s$ 位于喇曼增益谱的带宽范围内,探测波就会由于喇曼增益而被放大. 如果光纤输入端仅有泵浦波入射,自发喇曼散射产生的信号将起到探测波的作用,并在传输过程中被放大. 因为自发喇曼散射在整个喇曼增益谱宽内产生光子,所以所有频率分量都被放大,可是对应 g_R (喇曼增益)最大的频率分量建立最快. 对于纯石英光纤, g_R 的最大值所对应的频率是由泵浦频率下移 13.2 THz(440 cm^{-1}). 当泵浦功率超过某一阈值时,此频率分量近似指数增长. 这样,SRS 将导致斯托克斯波的产生,其频率由喇曼增益峰决定,对应的频移有时被称为喇曼频移或斯托克斯频移^[8].

* 江西省自然科学基金(0512016)资助

Tel: 0791-8120247 Email: jxsdrf@yahoo.com.cn

收稿日期: 2005-10-20

以实验为例,泵浦光为 532 nm,来计算一级斯托克斯线,二级斯托克斯线和三级斯托克斯线.

$$\nu = \frac{c}{\lambda}$$

$$\Delta\nu = \frac{c}{\lambda^2} \Delta\lambda$$

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{c} \Delta\nu$$

$$\lambda_0 = 532 \text{ nm} \quad \lambda_1 = 544.45 \text{ nm}$$

$$\lambda_1 = 545 \text{ nm} \quad \lambda_2 = 558.07 \text{ nm}$$

$$\lambda_2 = 558 \text{ nm} \quad \lambda_3 = 571.00 \text{ nm} \quad (2)$$

由计算可知,一级斯托克斯线为 544.45 nm,二级斯托克斯线为 558.07 nm,三级斯托克斯线为 571.00 nm.

2.2 喇曼阈值

喇曼阈值定义为,在光纤的输出端斯托克斯功率与泵浦功率相等时的入射泵浦功率,即

$$P_s(L) = P_p(L) \equiv P_0 \exp(-\alpha_p L) \quad (3)$$

式中 $P_0 = I_0 A_{\text{eff}}$ 是入射泵浦功率, A_{eff} 是有效纤芯面积, I_0 是入射泵浦光强.

假设喇曼增益谱为洛伦兹型,临界泵浦功率近似为

$$P_0^{\text{cr}} \approx 16 \frac{A_{\text{eff}}}{g_R L_{\text{eff}}} \quad (4)$$

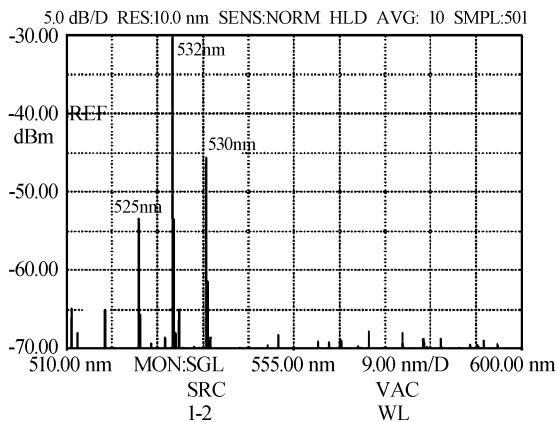
式中, $L_{\text{eff}} = [1 - \exp(-\alpha_p L)] / \alpha_p$, 以实验为例,取可见光区单模典型值 $g_R = 1.9 \times 10^{-13} \text{ m/W}$, $\alpha_p = 0.1 \text{ dB/cm}$, $L = 10 \text{ cm}$ 光纤直径为 $r = 800 \text{ nm}$, 算得在上述情况下

$$P_0^{\text{cr}} = 172.2 \text{ W} \quad (5)$$

从计算结果可以看出,当把光纤直径拉小致亚微米量级时,即使用很短长度的光纤,喇曼阈值也可以很容易达到.

3 四波混频

四波混频的相位匹配条件要求 $\Delta k = 0$ ^[8], 即



(a) Spectrum generated by a standard fiber

$$\Delta k = k_3 + k_4 - k_1 - k_2 = (n_3 \omega_3 + n_4 \omega_4 - n_1 \omega_1 - n_2 \omega_2) / c = 0 \quad (6)$$

在 $\omega_1 = \omega_2$ 的特定条件下,满足 $\Delta k = 0$ 相对要容易一些,光纤中的FWM大多属于这种部分简并情形.在物理上,它用类似于 SRS 的方法来表示.频率为 ω_1 的泵浦波产生两对称边带,频率分别为 ω_3, ω_4 ,其频移为

$$\Omega_s = \omega_1 - \omega_3 = \omega_4 - \omega_1 \quad (7)$$

这里假定 $\omega_3 < \omega_4$. 式(7)表示四波混频把强泵浦波的能量传输给相对于泵浦频率 ω_1 发生了上、下频移的两个波,其频移量由此给出.

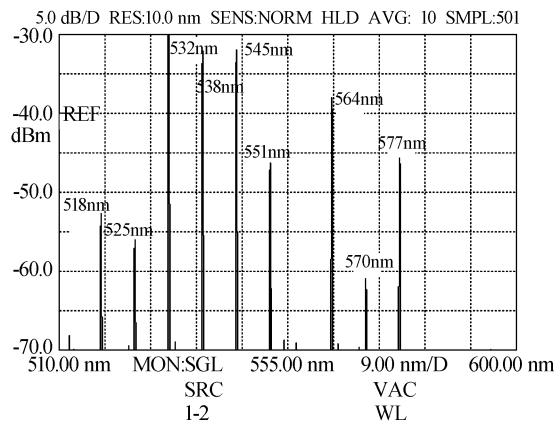
例如,在实验中, $\omega = \frac{2\pi c}{\lambda}$, $k = \frac{n\omega}{c}$, 其中泵浦波长

$\lambda = 532 \text{ nm}$, n 由 Shellmeier 方程 $n^2 = A + \frac{B}{1 - C/\lambda^2} + \frac{D}{1 - E/\lambda^2}$ 给出.

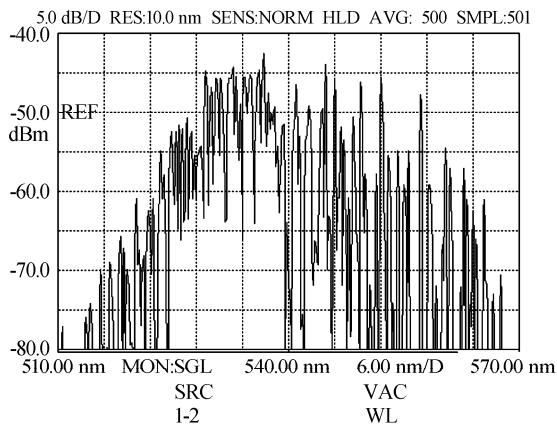
方程中 $A = 1.3156569$, $B = 0.7901384$, $C = 1.0993430 \times 10^{-2}$, $D = 1.0248690$, $E = 0.1080$. 算得产生的上、下频移的两个波的波长分别为 $\lambda_1 = 518 \text{ nm}$, $\lambda_2 = 546.8 \text{ nm}$.

4 实验结果及其分析

实验结果如图2,图2(a)是平均激光功率为 $1.5 \mu\text{W}$ 时,直径为 $125 \mu\text{m}$,长为 1 m 的标准单模光纤输出的光谱图.从图2(a)可以看出,除了泵浦光 532 nm ,另外还有两条较明显的谱线 525 nm 和 538 nm . 它们是由于波导内符合相位匹配条件而产生的四波混频效应 ($\omega_p + \omega_p \rightarrow \omega_s + \omega_a$), 其中 ω_p, ω_s 和 ω_a 分别代表泵浦光,斯托克斯线和反斯托克斯线.从光谱图2(a)可以看到,由于光纤中的峰值功率没有达到产生 SRS 的阈值,在这根用来作参照对比的标准单模光纤中没有产生 SRS 效应而只产生了四波混频.与之相比较,用相同的泵浦功率输入直径为 900 nm ,



(b) Spectrum generated by submicro-diameter fiber optic for diameter



(c)Spectrum generated by submicro-diameter fiber optic under the average of 500 scanning times

图 2 实验结果图

Fig. 2 The results of experiences

长为 12 cm 的亚微米直径光纤,如图 2(b),从 OSA 中可以观察到了更多的输出谱线.

除了在这根亚微米直径光纤前端纤未连接亚微米直径光纤的标准单模光纤部分已经产生的四波混频结果,(525 nm 和 538 nm(同图 2(a))),还有 545 nm, 551 nm, 564 nm, 570 nm, 577 nm. 也就是说,532 nm 及由四波混频产生的 525 nm, 538 nm 均作为泵浦光被一同输入亚微米直径光纤中,由于光纤直径小使得光纤内输入光功率密度大并且降低了 SRS 的阈值,由此,在亚微米直径光纤的输出端成功的观察到 SRS 现象. 从图 2(b)可以看出,545 nm 和 577 nm 是 532 nm 产生的一级和三级斯托克斯线,518 nm 是 532 nm 产生的一级反斯托克斯线. 另外,551 nm 和 564 nm 是 538 nm 产生的一级和二级斯托克斯线;当然 564 nm 中可能也包含有 518 nm 产生的三级斯托克斯线. 然而,在图 2(b)中没有观察到 532 nm 产生的二级斯托克斯线,这是由于平均扫描次数太低(只有十次),以致于 OSA 不能及时记录下二级斯托克斯线. 由实验结果可知,OSA 实际测得的谱线与前文计算所得的理论值符合的较好. 最后,考虑到泵浦光重复频率太低,OSA 不能完全记录亚微米直径光纤中所有产生的频谱这个因素,将 OSA 的平均扫描次数调整到 500 次. OSA 中输出了一段超连续谱(如图 2(c)),与相同条件下未亚微米直径光纤中产生的非线性光谱相比,在亚微米直径光纤中产生了更多的谱线. 这一喜人的结果表明拉制的亚微米直径光纤的非线性系数较大,在激光的频率转换和产生方面有潜在的应用价值,特别是对开发应用于目前使用的光通信系统中的准低功率宽带喇曼放大器和低功率可调谐喇曼激光器有十分深远的意义^[9].

5 结论

理论和实验两方面都表明,与传统标准单模光纤相比,亚微米直径光纤的非线性系数较大,输出的谱线较多,可以预言,亚微米直径光纤因其尺寸小和显著的近场光学效应引起一系列在宏观光学中难以出现的有趣现象,未来必是亚微米和纳米尺寸光子器件和高密度集成的基本组件. 除了可以被应用于现行光通信系统中的低功率宽带喇曼放大器和低功率可调谐喇曼激光器外,还将在微电子,材料,生物^[10]和化学等研究领域显示出潜在的应用价值.

参考文献

- [1] ZHANG Liang, ZHANG Jian, QIN Li, *et al.* Study on high-energy ytterbium-ions-doped fiber laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(7):975-978.
张亮,张健,秦莉,等. 高能掺镱离子光纤激光器的研究[J]. *光子学报*, 2005, **34**(7):975-978.
- [2] XIN Guo-feng, HUA Ji-zhen, CHEN Guo-ying, *et al.* 941 nm 2% duty cycle high output power semiconductor laser diode array[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **33**(5):521-523.
辛国锋,长吉珍,陈国鹰,等. 941 nm 2% 占空比大功率半导体激光器线阵列[J]. *光子学报*, 2005, **33**(5):521-523.
- [3] YAN Hui-ming, WAN Peng, WU Xing-kun. 1×2 micromachining based direct-coupled fiber optical switch[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(5):536-538.
晏辉鸣,万鹏,吴兴坤. 光纤直接耦合微加工型 1×2 光开关[J]. *光子学报*, 2005, **33**(5):536-538.
- [4] BLACK R J, GONTHIER F, LACROIX S, *et al.* Tapered fibers: an overview[C]. *SPIE*, 1987, **839**:2-19.
- [5] JAIN R K, LIN C, STOLEN R H, *et al.* A high-efficiency tunable cw raman oscillator[J]. *Appl Phys Lett*, 1977, **30**(5):1215-1228.
- [6] BIRKS T A, OAKLEY K P, HUSSEY C D. Adiabaticity of miniature loops in tapered single-mode fiber[J]. *Electron Lett*, 1992, **28**(3):2034-2035.
- [7] SHEN Y R. The principles of nonlinear optics[M]. New York: Wiley Press, 1984. 268-285.
- [8] QIAN Shi-xiong, WANG Gong-ming. Nonlinear optical principles and progress. Shanghai: Fudan University Press, 2001. 134-148, 156-166.
钱士雄,王恭明. 非线性光学原理与进展[M]. 上海:复旦大学出版社, 2001. 134-148, 156-166.
- [9] XIN X J, YU C X, ZHANG R. The influence of configuration of raman fiber amplifier[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(2):140-143.
- [10] WU Meng, LIN Zhi-hong, REN Shu, *et al.* The submicron fiber-optic biochemical sensors[J]. *Journal of Transducer Technology*, 1997, **16**(6):1-7.
吴蒙,林志红,任怨,等. 亚微米光纤生物化学传感器[J]. *传感器技术*, 1997, **16**(6):1-7.

The Reseach on Nonliner Effect of Submicrodiameter Fiber-Optic

RAO Feng, YE Zhi-qing, LIU Hong-juan

(*Key laboratory of Photo Electronic & Telecommunication of Jiangxi Province ,
Jiangxi Normal University, Nanchang 330022*)

Received date: 2005-10-20

Abstract The nonlinear coefficient and Raman effect of submicro-diameter optic fiber are analyzed by rigorous electromagnet solution. The results show that submicro-diameter optic fiber with about 700 nm diameter has large nonlinear coefficient, smaller Raman threshold, more Raman spectral lines compared with the common optical fiber. The analysis of enhanced Raman phenomena shows that enhanced by low pump power, the power density of submicro-diameter fiber optic is so large that it is easy to observe SRS effect. Experimental results fit well with theoretical analysis.

Key words Nonlinear optics; Submicro-diameter optical fiber; Weak light



RAO Feng was born in 1983, and in Jiangxi Province. He received his B. S. degree from Jiangxi Normal University in 2004. He is now pursuing his M. S. degree at Key Laboratory of Photo-electronic & Communication of Jiangxi Province, Jiangxi Normal University. His research interests include fiber optic communication and fiber optic biosensor.