

石英单模光纤中非线性光谱特性的实验研究

张 鹏 田春林

长春理工大学机电工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 搭建了一台用于研究石英单模光纤中非线性光谱特性的实验系统。利用磷酸钛氧钾(KTP)晶体倍频电光调 Q 脉冲 Nd³⁺:YAG 固体激光器,将输出脉宽为 10 ns,最大峰值功率达到 50 MW,波长为 531.81 nm±0.26 nm 的激光作为抽运光源,抽运长度分别为 250 m 和 500 m 的石英单模光纤。根据马吕斯定律使用偏振片调节抽运光的输出能量。在实验系统稳定工作的条件下,调节抽运光输出能量分别为 220.6 kW 和 170 kW 时,获得了可见光范围内 250 m 和 500 m 石英单模光纤的多级非线性光谱。基于石英单模光纤中的三阶非线性理论,分析了实验中所获得非线性光谱的特性。理论分析和实验数据均表明:石英单模光纤长度越长,非线性光谱强度、耦合增益系数越大,能量阈值越低,而石英单模光纤长度越短,非线性谱线的展宽和散射附加峰的产生越容易。

关键词 非线性光学;单模光纤;光谱频移;受激拉曼散射

中图分类号 O437 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0819001

Characteristics of Nonlinear Spectrum in Quartz Single Mode Fiber

Zhang Peng Tian Chunlin

*College of Mechanical and Electric Engineering, Changchun University of Science and Technology,
Changchun, Jilin 130022, China*

Abstract An experiment system is set up for studying the characteristics of nonlinear spectrum in quartz single mode fiber. The electro-optical Q-switched pulsed Nd³⁺:YAG solid laser, frequency-doubling by potassium titanium oxide phosphate (KTP) crystal, with output pulse width of 10 ns, the maximum peak power of 50 MW, and wavelength of 531.81 nm±0.26 nm, is used to pump the quartz single mode fibers with lengths of 250 m and 500 m. Based on the principle of Malus law, a polarizing plate is used to adjust the output power of the pumping source. Under the stable operation condition, multi stage nonlinear spectra of 250 m and 500 m quartz single mode fibers in the visible region are obtained, while the output powers of pumping sources are 220.6 kW and 170 kW. Based on the principle of the third-order nonlinear effects in quartz single mode fiber, the characteristics of the nonlinear spectra obtained in the experiment are analyzed. Both the theoretical analysis and experimental results indicate that the longer the length of quartz single mode fiber, the larger the relative intensity of nonlinear spectrum and the coupling gain coefficient, and the smaller the energy threshold; while the shorter the length of quartz single mode fiber, the easier the broadening of nonlinear spectra and the generation of scattering additional peak.

Key words nonlinear optics; single mode fiber; spectrum frequency shift; stimulated Raman scattering

OCIS codes 190.4370; 060.2430; 300.6450; 190.5650

1 引 言

光通信技术就是将光信号无失真地从信号源传输到接收终端,但实际上,任何光纤在光信号的传输过程中都伴随着光信号的损耗和色散。目前,对于光纤传输的色散和衰减的研究已经十分成熟,这两种损耗均与光纤长度呈线性关系,随着光纤放大器技术对光信号功率的补偿作用,光纤中的损耗对光通信系统的影响已

收稿日期: 2016-03-28; **收到修改稿日期:** 2016-05-03

基金项目: 国家 863 计划(2012AAXX090)

作者简介: 张 鹏(1988—),男,博士研究生,主要从事激光应用技术方面的研究。

E-mail: 2014200051@ mails.cust.edu.cn

导师简介: 田春林(1972—),男,博士,副研究员,博士生导师,主要从事光机电一体化方面的研究。

E-mail: 48851795@qq.com(通信联系人)

经显得不那么重要^[1-4]。然而,随着信息量的不断增加,通信光功率呈现几何式的增长,导致光纤中的受激非线性效应现象愈加明显^[5-6],对光通信系统带来的影响也日益严重^[7-8]。这些非线性效应的产生机理十分复杂,其产生过程具有瞬时性和不确定性,随着通信光功率、光纤传输长度及外界环境参数的变化,所产生的非线性效应也会产生相应的变化^[9-12]。

受激非线性散射现象分为受激拉曼散射(SRS)和受激布里渊散射(SBS)。当这两种散射达到一定的阈值条件时,会产生相应的斯托克斯光和反斯托克斯光;当所产生新的受激散射光频率小于抽运光频率,被称为斯托克斯光;当产生的受激散射光频率大于抽运光频率,被称为反斯托克斯光。

为了研究和分析 532 nm 高功率激光在石英单模光纤(SMF)中的这几种典型的非线性效应,本文搭建了一台用于采集石英单模光纤受激非线性光谱的实验系统,利用脉冲 Nd³⁺:YAG 激光器倍频输出的 532 nm 高功率激光作为抽运光源,获得了不同长度单模石英光纤相对稳定的非线性光谱,并对这些光谱数据进行理论分析和讨论。

2 理论分析

由于不同频率的受激发光的非线性增益不同,由抽运光与工作介质耦合作用的半经典理论分析可知,对于频率为 ω_0 的单频抽运光,在工作介质内所产生受激非线性散射的总光强可表示为

$$I_n = I_0 \exp[-G_n z], \quad (1)$$

式中 I_0 为抽运光的总光强, z 为抽运光在工作介质内的传输距离, G_n 为工作介质中受激非线性散射的耦合增益系数。根据受激非线性散射的量子理论描述,单位时间内总的受激非线性散射光之数增加速率可表示为

$$\frac{dI_n}{dt} = 2\Omega_0 N_a c \sigma \cdot I_0 \cdot \bar{n}(\omega_n), \quad (2)$$

式中 Ω_0 为受激非线性散射光的立体发散角范围, N_a 为工作介质单位体积内处于本征能级 a 上的分子数密度, c 为光速, σ 为分子的受激非线性散射微分截面, $\bar{n}(\omega_n)$ 为受激非线性散射的光子简并度。假设受激非线性散射光的平均光强为 $I(\omega_n)$, $\Delta\bar{\omega}_n$ 为受激非线性散射光的平均谱线宽度,则有

$$I_n \approx I(\omega_n) \Delta\bar{\omega}_n, \quad (3)$$

根据非线性光学基本理论可以推导得到受激非线性散射光的光子简并度可表示为

$$\bar{n}(\omega_n) = \frac{I(\omega_n)}{(2h\omega_n/\lambda_n^2)\Omega_0}, \quad (4)$$

式中 h 为普朗克常量, ω_n 为受激非线性散射光频率,则(2)式可简化为

$$\frac{dI(\omega_n)}{dt} = N_a c \sigma \cdot \frac{\lambda_n^2}{h\omega_n \Delta\bar{\omega}_n} I_0 \cdot I(\omega_n), \quad (5)$$

在稳定状态下,受激非线性散射过程与时间不再具有显函数关系,令 $dt = dz/c$,则(5)式可进一步表示为

$$\frac{dI(\omega_n, z)}{dz} = N_a \sigma \cdot \frac{\lambda_n^2}{h\omega_n \Delta\bar{\omega}_n} I_0 \cdot I(\omega_n, z), \quad (6)$$

将(6)式对 z 积分后可得

$$I(\omega_n, z) = I(\omega_n, 0) \exp(G_n z), \quad (7)$$

式中耦合增益系数 $G(\omega_n)$ 的表达式为

$$G(\omega_n) = N_a \sigma \frac{\lambda_n^2}{h\omega_n \Delta\bar{\omega}_n} I_0, \quad (8)$$

令 $g = N_a \sigma \frac{\lambda_n^2}{h\omega_n \Delta\bar{\omega}_n}$ 为工作介质的受激非线性散射耦合增益因子。

从(8)式中可以看出,受激非线性散射的耦合增益系数与单位体积内处于本征能级 a 上的分子数密度 N_a 、受激非线性散射微分截面 σ 、抽运光强 I_0 成正比,而与受激散非线性散射的光谱宽度 $\Delta\bar{\omega}_n$ 成反比。对于给定的工作介质来说,本征能级 a 上的分子数密度 N_a 和受激散射微分截面 σ 就可以看作常数,为了便于分析计算,忽略抽运光 I_0 在工作介质内的传输损耗,将 I_0 也近似看作常数,耦合增益系数只受到受激非线

性散射光谱宽度影响。因此,不同的非线性效应的耦合作用,导致各级受激非线性光谱相对能量强度呈现不同规律分布现象。

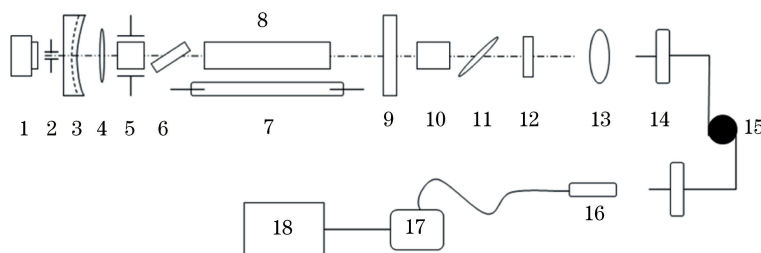
受激非线性散射光在光纤介质中传输难免会产生介质吸收及散射损耗,而且特定的抽运光源内已包含的散射光子数也决定了产生受激非线性散射的概率。这两个原因决定了光纤在 532 nm 脉冲激光的抽运下产生的受激非线性散射具有明显的阈值性。对于脉冲形式的高能量抽运光源通过单模光纤介质的受激非线性散射过程,其阈值条件可以表示为

$$\exp\{[G(\omega_n) - \alpha]z\} \gg 1, \quad (9)$$

式中 α 为光纤介质对于抽运光源的衰减系数, z 为散射介质的增益长度。从(9)式中可以看出,若要满足阈值条件需要高功率的抽运光源和长度较长的增益介质。

3 实验装置

实验装置如图 1 所示,抽运光源采用磷酸钛氧钾(KTP)晶体腔外倍频的电光调 Q 脉冲 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 激光器,使用光谱仪测量激光输出波长 $531.81 \text{ nm} \pm 0.26 \text{ nm}$,脉宽在 10 ns 左右,利用脉冲光电探测器和带宽 200 MHz、采样频率 2.0 GSa/s 的 Tektronix 公司 TDS2022 型双通道示波器实时监测耦合进通信单模光纤的抽运光脉冲宽度。激光最大输出峰值功率不小于 50 MW。根据马吕斯定律,用偏振片调节抽运光能量,在聚光腔的输出端放置一个直径为 1.2 mm 的小孔光阑,通过小孔选模选择抽运光模式为准基模,激光光束经过焦距 $f=24 \text{ mm}$ 的凸透镜聚焦,通过光学精密调整架的调节,将抽运光耦合进入石英单模光纤。实验所使用的石英单模光纤是武汉 YOFC 公司生产的 G.652D 型 SMF,光纤内纤芯直径为 $9\sim 10 \mu\text{m}$,外包层直径为 $125 \mu\text{m}$,零色散波长范围为 $1302\sim 1322 \text{ nm}$,将石英单模光纤的输出端放置在一端带有硫酸纸制作的光屏的暗室中,以减少背景自然光对 SRS 光谱测量的影响,石英单模光纤输出的光斑落在光屏上,用美国 Ocean Optics 公司的 USB2000+ 型光纤光谱仪采集光谱,光谱仪分辨率为 $\pm 2.06 \text{ nm}$ 。



1. laser diode, 2. small aperture, 3. 1064 nm high reflecting mirror, 4. $\lambda/4$ plate, 5. potassium dideuterium phosphate (KDP) crystal, 6. Brewster plate, 7. pulse Xenon lamp, 8. $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ crystal rod, 9. output mirror, 10. KTP crystal, 11. narrow band filter, 12. polaroid plate, 13. focusing lens, 14. fiber flange plate, 15. single mode fiber, 16. receiving fiber, 17. spectrometer, 18. personal computer

图 1 石英 SMF 的非线性光谱实验装置原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the experiment of the SRS spectrum in quartz SMF

4 结果与讨论

分别对 250 m 和 500 m 两个长度的石英单模光纤进行了 532 nm 激光抽运受激非线性散射实验,通过示波器实时监测,抽运光工作能量不稳定性小于 5%,脉宽约为 10 ns,使用可 360° 旋转的偏振片调节抽运光,获得了从 $10 \mu\text{J}\sim 10 \text{ mJ}$ 可调节输出的单脉冲能量。采集了不同抽运光峰值功率条件下 250 m 和 500 m 石英单模光纤的受激非线性光谱,其中图 2(a),(b)为 250 m 石英单模光纤的受激非线性光谱,图 2(c),(d)为 500 m 石英单模光纤的受激非线性光谱。

根据 SRS 谱线的结构特点可以看出,图 2(c),(d)的光谱结构主要是由 SRS 效应引起的前向斯托克斯效应所致,各级谱线波长间隔基本相等。忽略光谱仪自身的分辨率精度对光谱波长错位的影响,认为与图 2(c),(d)对应的图 2(a),(b)光谱图中处于在同一位置的波长错位也是由 SRS 效应引起的,例如图 2(a)中的 545.41,559.28,571.35,586.79,600.77,616.02,649.22,674.05,692.4,711.87 nm 谱线和图 2(b)中的 545.75,555.47,571.35,648.56,670.76 nm 谱线;而图 2(a)中 552.35 nm 一般认为是由四波混频(FWM)引起

的 1 级斯托克斯效应的前向附加峰, 563.42 nm 是 2 级斯托克斯效应的前向附加峰, 而推测认为 610.27 nm 谱线可能是由 SRS 效应引起的 6 级斯托克斯效应的后向附加峰, 644.23 nm 是 8 级斯托克斯效应的后向附加峰。按照 SRS 效应理论推测, 在 632.52 nm 谱线附近应该会产生一个 7 级斯托克斯效应, 而实际图 2(a) 中却出现了缺级现象, 反而出现了 626.47 nm 谱线。推测认为这也可能是由于 SRS 效应引起的波长漂移所致, 当然也不排除产生了自相位调制 (SPM) 或交叉相位调制 (XPM) 等非线性效应的可能。图 2(b) 中的谱线结构较图 2(a) 更为复杂, 其中除了由 SRS 效应引起的斯托克斯效应产生的谱线外, 还产生了由 FWM 效应引起的 536.35 nm 谱线, 即 0 级斯托克斯效应的前向附加峰; 541.58 nm 和 550.27 nm 是可能由 1 级斯托克斯效应产生的前向和后向附加峰, 也可能是由 2 级斯托克斯效应产生的后向附加峰。依此类推, 563.77, 592.94, 605.19, 611.29, 629.16, 687.16, 697.93 nm 谱线均可能是由 FWM 效应引起的, 而对于 629.16, 687.16, 697.93 nm 这三条谱线则产生了明显的谱线展宽现象, 更有可能是产生了 SPM 效应和 XPM 效应。而且图 2(b) 中还出现了 527.61 nm 谱线, 分析认为这条谱线可能是 SRS 效应引起的反向斯托克斯谱线, 也可能是由于附近的几级谱线发生了 FWM 效应而产生的, 还有可能是由于附近的几级谱线发生了 SPM 和 XPM 效应引起的谱线结构的变化。图 2(c)、(d) 中的光谱谱线主要是由 SRS 效应引起的斯托克斯谱线。其中, 图 2(c) 所产生的是较为标准的 1~9 级正向斯托克斯谱线。图 2(d) 中的 0 级和 2 级斯托克斯谱线出现的前向附加峰, 应该是由 FWM 效应引起的, 其余谱线则是由 SRS 效应引起的 1~13 级斯托克斯谱线。

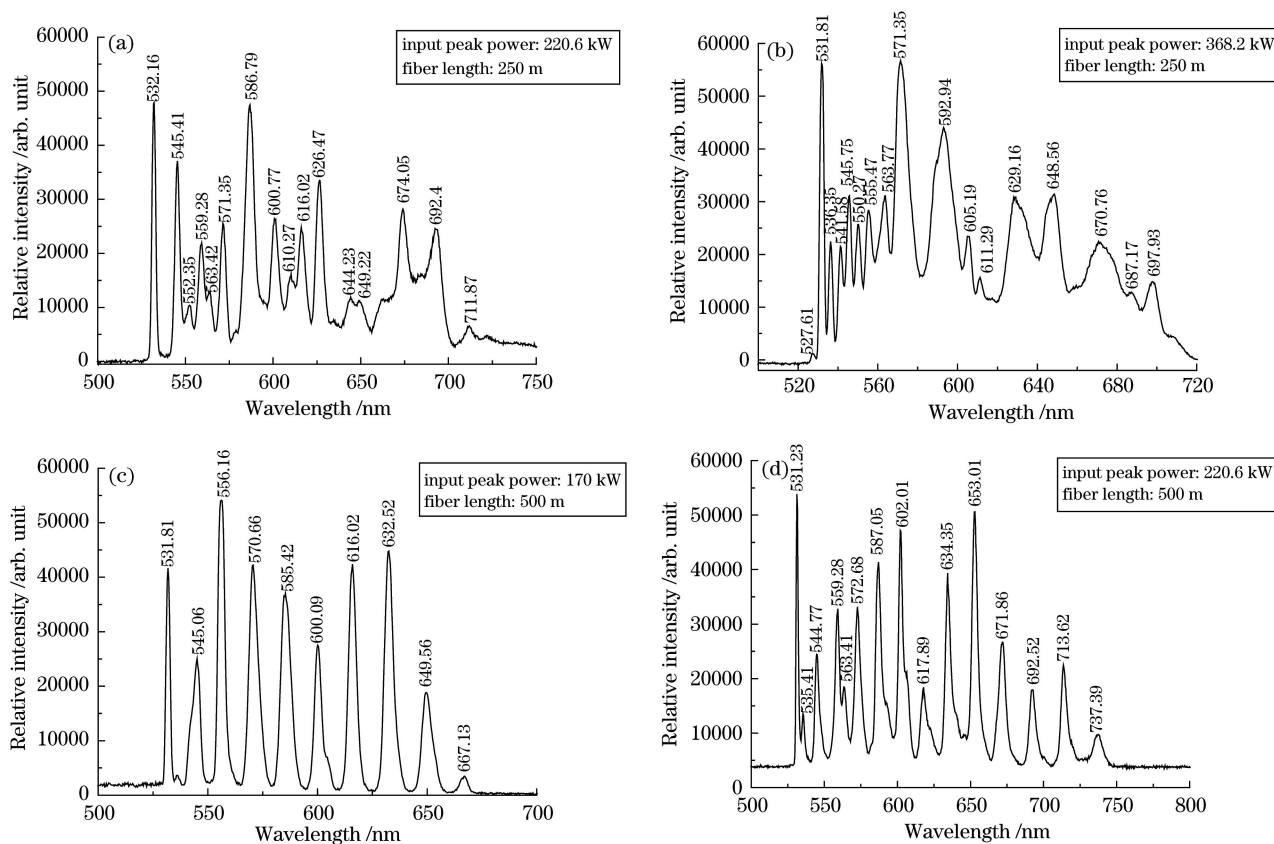


图 2 石英单模光纤受激非线性光谱

Fig. 2 Stimulated nonlinear spectra of quartz SMF

从图 2 中的光谱结构分析来看, 可以认为, 在抽运光能量越高, 光纤越短的实验条件下, 在 532 nm 抽运光抽运 SMF 中, FWM、SPM、XPM 以及 SRS 等非线性效应比 SRS 更容易产生, 说明 FWM、SPM、XPM 以及 SRS 效应的能量阈值要高于 SRS 效应的能量阈值, 而石英单模光纤工作介质长度的增加, 对 FWM、SPM、XPM 以及 SRS 效应的产生起到了抑制作用。图 2 中的谱线波长在相同的斯托克斯级数下均出现错位, 这是由于光谱仪自身的分辨率精度为 ± 2.06 nm, 大部分波长的错位精度均在这个范围内, 忽略系统误差, 认为实验结果与理论分析相符合。

从图 2 中还可以看出,两种长度的石英单模光纤受激散射谱线的强度呈现不规则变化分布,各级谱线强度分布高低不同,在受激非线性光谱的局部区域,受激非线性谱线强度随着光谱级数的增加而逐级降低。从图 2(a)和图 2(d)对比分析来看,在抽运光的峰值功率相同的条件下,500 m 的石英单模光纤受激非线性谱线强度要高于 250 m 的单模光纤的受激非线性谱线强度,说明石英单模光纤的长度越长,对受激非线性效应的增益越大;而且部分受激非线性谱线出现了展宽现象,250 m 石英单模光纤的受激非线性光谱的展宽现象比 500 m 石英单模光纤谱线的展宽现象要明显,尤其是 3 级和 4 级斯托克斯谱线,也说明了石英单模光纤的长度越长,对受激非线性散射光谱谱线展宽效应的抑制作用越大。通过图 2(a)、(d)的对比分析还可以看出,在相同的抽运光功率下,500 m 石英单模光纤产生了 13 级受激非线性谱线,250 m 石英单模光纤产生了 11 级受激非线性谱线,说明较长的石英单模光纤对于受激非线性谱线的产生起到了增益作用。

在相同的实验条件下,对脉冲 532 nm 激光抽运石英单模光纤的 SRS 谱线进行了实验测量,图 3(a),(b)为 250 m 石英单模光纤的 SRS 谱线,图 2(c),(d)为 500 m 石英单模光纤的 SRS 谱线。

整体来看,250 m 和 500 m 石英单模光纤的 SRS 谱线在结构形式上还是有很大差别的,250 m 石英单模光纤的多级谱线呈现出了双峰频移、谱线展宽,有产生连续谱的趋势。而 500 m 石英单模光纤的光谱频移在结构上比较单一,各级 SRS 谱线略有展宽,但是相对不明显,整体呈现出 SRS 效应。从光谱相对强度上来看,尽管 250 m 石英单模光纤的抽运光耦合能量要高于 500 m 石英单模光纤,但是两者的光谱频移相对强度大致相等,说明 500 m 石英单模光纤的受激非线性光谱频移的能量阈值要低于 250 m 石英单模光纤的能量阈值。

从图 3(a),(b)中还可以看出产生了一162.15 的频移,如果认为这条谱线是由-1 级的反斯托克斯光频移产生,那么可能就是由 SBS 效应引起的;如果认为这条谱线是由 0 级斯托克斯光后向附加峰频移产生,那就是由 FWM 效应引起的。而图 3(c),(d)和图 2(c),(d)均表明没有产生这条相应位置的谱线。这也说明了在 250 m 的石英单模光纤中更容易发生 SBS 和 FWM 效应。

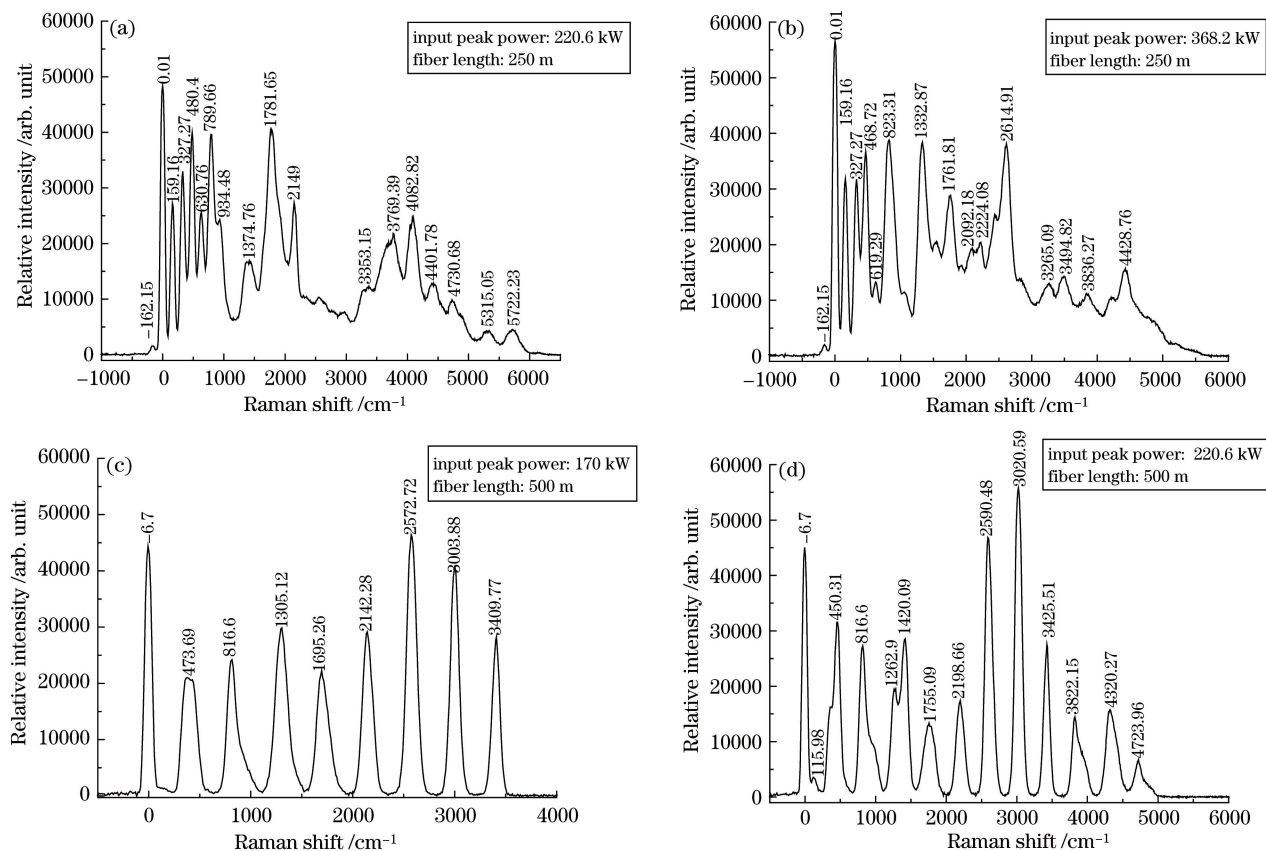


图 3 石英单模光纤受激拉曼散射谱线

Fig. 3 Stimulated Raman scattering spectra of quartz SMF

上述现象是石英单模光纤中非线性效应相互作用所致。对于 500 m 石英单模光纤的光谱频移来说,起主要作用的非线性效应就是 SRS 效应,光谱频移结构符合 SRS 理论。尽管光谱频移强度没有完全呈现逐级递减的趋势,但是光谱结构和频移范围均满足光纤 SRS 的基本特性,然而 250 m 石英单模光纤的光谱频移显得比较复杂。单从光谱频移结构上来看,前 7 级的光谱频移应该主要是由 SRS 效应影响的,在这 7 级光谱频移中,3~7 级光谱频移还出现了附加峰谱线频移,这就说明在这 5 级谱线中还可能出现 SPM 和 XPM,甚至可能出现 FWM 等非线性效应;而 7 级之后的光谱频移,除了前 7 级所出现的非线性效应以外,根据信号分析理论可知,250 m 石英单模光纤中还产生了 SPM 和 XPM 非线性效应,频谱的变化必然使得波形变化,从而使传输脉冲的波形被展宽。还有一种可能是由于石英单模光纤中的群速度色散效应与这些非线性效应共同作用导致了光谱频移谱线不同程度上的展宽现象,甚至产生连续谱。

5 结 论

通过 532 nm 激光抽运不同长度的石英单模光纤诱导产生受激非线性光谱实验,分别研究了光纤长度对受激非线性谱线强度、能量阈值、耦合增益系数、谱线展宽、产生受激非线性散射附加峰等光谱特性的影响。理论分析了石英单模光纤中的受激非线性效应的作用和耦合增益系数对光谱结构的影响,实验结果表明石英单模光纤长度越长,受激非线性效应谱线强度越大,能量阈值越低,耦合增益系数越大,而石英单模光纤长度越短,受激非线性谱线展宽效应越明显,越容易产生受激非线性散射附加峰,与理论分析的结果相吻合。该结论为进一步研究石英单模光纤作为传输介质的大容量光通信系统中的受激非线性效应和纳秒量级 532 nm 固体脉冲激光诱导可见光范围的超连续光谱提供了一定的理论基础和参考依据。

参 考 文 献

- 1 Stolen R H, Ippen E P, Tynes A R. Raman oscillation in glass optical waveguide[J]. Applied Physics Letters, 1972, 20(2): 62-64.
- 2 Chen Xiaogang, Huang Dexiu, Yuan Xiuhua, *et al.* Wavelength division multiplexing/optical code division multiplexing system based on supercontinuum and superstructured fiber Bragg grating[J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(1): 77-81.
陈小刚, 黄德修, 元秀华, 等. 基于超连续谱和超结构光纤光栅的波分复用/光码复用系统[J]. 中国激光, 2008, 35(1): 77-81.
- 3 Xu Gang. Application and nonlinear effects in optical fiber [J]. Journal of Xi'an University of Post and Telecommunications, 2006, 11(5): 52-25.
许刚. 光纤中非线性效应及应用[J]. 西安邮电学院学报, 2006, 11(5): 52-55.
- 4 Tan Yong, Huang Qiushi, Song Xuedi, *et al.* Study of simulated Raman scattering and four wave mixing in an optical fiber combination[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(6): 1451-1455.
谭勇, 黄秋实, 宋雪迪, 等. 组合光纤中受激拉曼散射和四波混频研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(6): 1451-1455.
- 5 Li Yabin, Jia Dongfang, Pang Songtao, *et al.* Stimulated Raman scattering and its suppression in a single-mode fiber induced by high-power nanosecond optical pulse[J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(12): 3198-3202.
李亚滨, 贾东方, 庞松涛, 等. 高功率纳秒光脉冲在单模光纤中的受激喇曼散射及抑制研究[J]. 光子学报, 2009, 38(12): 3198-3202.
- 6 Yang Yuanhong, Yang Wei, Jiang Ting, *et al.* Investigation on characteristics of simulated Raman threshold in a single mode fiber[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(1): 0129001.
杨远洪, 杨巍, 蒋婷, 等. 单模光纤中受激拉曼散射的阈值特性研究[J]. 光学学报, 2014, 34(1): 0129001.
- 7 Liu Chu, Eric Rees, Toni Laurila, *et al.* Experimental research on supercontinuum generation from nanosecond pulse and conventional single mode fiber[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(7): 0705003.
刘楚, Eric Rees, Toni Laurila, 等. 纳秒脉冲在普通单模光纤中产生超连续谱的实验研究[J]. 中国激光, 2011, 38(7): 0705003.
- 8 Men Zhiwei, Sun Xiuping, Gao Shuqin, *et al.* Temperature dependence of additional peaks characteristics of single mode silica fiber stimulated Raman scattering[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, 29(6): 1566-1569.
门志伟, 孙秀平, 高淑琴, 等. 温度变化对单模石英光纤受激拉曼散射附加峰的影响[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(6): 1566-1569.

- 9 Zhang Long, Han Hainian, Hou Lei, *et al.* Supercontinuum generation in photonic crystal fiber and tapered single-mode fiber[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(19): 194208.
张 龙, 韩海年, 侯 磊, 等. 基于光子晶体光纤和拉锥式单模光纤的超连续光谱产生的实验研究[J]. *物理学报*, 2014, 63(19): 194208.
- 10 Gao Juanjuan, Li Xia, Gao Song, *et al.* High power mid-infrared supercontinuum generation in silica photonic crystal fiber[J]. *Chinese J Luminescence*, 2015, 36(2): 225-230.
高娟娟, 李 夏, 高 松, 等. 石英光子晶体光纤中高功率中红外超连续谱的产生[J]. *发光学报*, 2015, 36(2): 225-230.
- 11 Sun Xiuping, Feng Kecheng, Zhang Xihe, *et al.* Study on temperature character of stimulated Raman scattering spectrum in silica fiber[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2007, 27(10): 2049-2052.
孙秀平, 冯克成, 张喜和, 等. 单模石英光纤受激拉曼散射温度特性研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2007, 27(10): 2049-2052.
- 12 Sun Xiuping, Feng Kecheng, Zhang Xihe, *et al.* Study of polarized characters of stimulated Raman scattering spectrum in single mode circular fiber[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(8): 1169-1171.
孙秀平, 冯克成, 张喜和, 等. 单模圆光纤中受激拉曼散射光谱偏振特性的研究[J]. *光子学报*, 2005, 34(8): 1169-1171.