

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*

李亚滨, 贾东方[†], 庞松涛, 刘洋, 赵川, 王肇颖, 葛春风, 李世忱

(天津大学 精密仪器与光电子工程学院 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

摘 要:利用包含喇曼增益、抽运消耗、自相位调制、交叉相位调制和群速度色散效应的耦合非线性薛定谔方程组,对千瓦级高功率纳秒脉冲在单模光纤中的传输特性进行了模拟计算.分析了输入脉冲和斯托克斯脉冲的演化过程,研究了大模面积光纤对受激喇曼散射的抑制作用.研究表明,采用模面积为 $530 \mu\text{m}^2$ 的光子晶体光纤作为惯性约束聚变脉冲整形系统的传输介质,能有效抑制受激拉曼散射,不但信号衰减较小,而且中心凹陷程度较低.

关键词:高功率纳秒脉冲;受激喇曼散射;大模面积光纤;非线性

中图分类号: O437.3

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2009)11-3198-5

0 引言

在惯性约束聚变(Inertial Confined Fusion, ICF)脉冲整形系统中,利用光纤技术把 LD 抽运的固体激光器和波导调制器集成在一起,并将脉冲整形后的激光脉冲传输到再生放大器进行放大.由于光纤中传输的是高功率的啁啾脉冲,加之光纤的有效模面积很小,因此受激喇曼散射(Stimulated Raman Scattering, SRS)会对脉冲的传输质量造成很大影响,并且会造成光学元件的严重损伤,从而对整形系统造成危害^[1-4].

对强激光在大气及激光等离子体中的 SRS 效应的研究表明^[5-7]:当发生 SRS 时,入射光的能量转化为散射光的能量、介质振动的能量及等离子体中的超热中子的能量,相干放大的散射光和大量的超热中子损失了许多入射能量,造成入射激光能量的严重损耗;超热中子的预热将降低 ICF 的效率,抑制强受激喇曼散射以利于进一步提高强激光系统的效率,已成为研究新一代 ICF 激光驱动器的关键问题之一.近年来,随着强激光技术在 ICF 研究中的一系列新进展,这一问题更加突出.

本文以数值方法模拟和分析了在 ICF 脉冲整形系统中, SRS 对高功率脉冲(波长为 $1\ 053 \text{ nm}$ 、功率在千瓦级、脉宽在纳秒级)在单模光纤中传输性能的影响,并研究了大模光纤对 SRS 的抑制作用.数值模拟分析结果表明,光子晶体光纤有望用于 ICF 系统中的脉冲传输.

1 高功率脉冲引起的 SRS

SRS 是指在任何分子介质中,自发喇曼散射将一小部分输入功率由一束光转移到另一频率下移的光束中,频移量由介质的振动模式决定,此过程为喇曼效应.输入光作为抽运产生称为斯托克斯(Stokes)光的频移光.而当这种非线性效应较大时,会严重影响光脉冲的性能和质量.因此有必要研究其物理变化过程,来避免对脉冲传输过程中的不利影响.

研究表明,普通单模光纤中受激喇曼散射的阈值功率通常可以近似表示为^[8]

$$P_{\text{th}} \approx G_{\text{R}} A_{\text{eff}} / g_{\text{R}} L_{\text{eff}} \quad (1)$$

式中, G_{R} 为喇曼阈值增益系数,一个较好的近似值约为 16; A_{eff} 为光纤有效模面积; L_{eff} 为光纤有效长度; g_{R} 为喇曼增益峰值.如果达到喇曼阈值,每个抽运脉冲将在频率下移约 13 THz 的载频 ω_s 处产生一个 Stokes 或喇曼脉冲.假设介质是瞬时响应的,则喇曼脉冲和抽运脉冲间的相互作用可由耦合非线性薛定谔方程组描述,此方程组包括喇曼增益、抽运消耗、自相位调制(Self Phase Modulation, SPM)、交叉相位调制(Cross Phase Modulation, XPM)和群速度色散(Group Velocity Dispersion, GVD)效应,表示为^[8-9]

$$\begin{aligned} \frac{\partial A_{\text{p}}}{\partial z} + \frac{1}{v_{\text{gp}}} \frac{\partial A_{\text{p}}}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_{2\text{p}} \frac{\partial^2 A_{\text{p}}}{\partial t^2} + \frac{\alpha_{\text{p}}}{2} A_{\text{p}} = \\ i\gamma_{\text{p}} [|A_{\text{p}}|^2 + (2 - f_{\text{R}}) |A_{\text{s}}|^2] A_{\text{p}} - \\ \frac{g_{\text{R}}}{2A_{\text{eff}} \lambda_{\text{p}}} |A_{\text{s}}|^2 A_{\text{p}} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial A_{\text{s}}}{\partial z} + \frac{1}{v_{\text{gs}}} \frac{\partial A_{\text{s}}}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_{2\text{s}} \frac{\partial^2 A_{\text{s}}}{\partial t^2} + \frac{\alpha_{\text{s}}}{2} A_{\text{s}} =$$

* 国家自然科学基金(60507001)、天津市科技发展基金(033800411)和天津大学青年教师基金资助

[†] Tel: 022-27402421

Email: jiadf@tju.edu.cn

收稿日期: 2008-10-28

修回日期: 2008-12-02

$$i\gamma_s [|A_s|^2 + (2-f_R) |A_p|^2] A_p + \frac{g_R}{2A_{\text{eff}}} |A_s|^2 A_p \quad (3)$$

式中, A_p 、 A_s 分别为输入脉冲和 Stokes 光的复振幅, λ_p 、 λ_s 分别为输入脉冲和 Stokes 光的波长, v_{gp} 、 v_{gs} 是对应的群速度, β_{2p} 、 β_{2s} 为 GVD 系数, γ_p 、 γ_s 为非线性系数, $\gamma_{p(s)} = 2\pi n_2 / \lambda_{p(s)} A_{\text{eff}}$, 其中 n_2 是非线性折射率, 参量 f_R 值约为 0.18.

由于 SRS 效应的存在, 有可能在激光通过具有喇曼活性介质时产生足够高的受激散射增益. 因此, 为了研究喇曼散射的影响, 为了便于进行模拟计算, 本文进行了几个假设对模型进行简化: 1) 由于脉宽足够宽, 可暂不考虑走离效应, 取 $v_{gp} = v_{gs}$. 2) 暂时只考虑一级 Stokes 谱线. 3) 光纤中非线性折射率随光强的变化很小, 暂时不考虑偏振态的影响. 4) 沿光纤传输产生的自发喇曼散射等价于在输入端同步输入小入射信号作为种子光, 其峰值功率取近似值为 1.26×10^{-7} W.

求解耦合方程时采用了对称分步傅里叶法, 单模光纤的参量值为 $A_{\text{eff}} = 80 \mu\text{m}^2$, $L = 1 \text{ km}$, $\lambda_p = 1053 \text{ nm}$, $\lambda_s = 1101 \text{ nm}$, $\alpha_p = 1.2 \text{ dB/km}$, $\alpha_s = 0.7 \text{ dB/km}$, $\beta_{2p} = 20 \text{ ps}^2/\text{km}$, $\beta_{2s} = 17 \text{ ps}^2/\text{km}$, $g_R = 3.2 \times 10^{-14} \text{ m/W}$ (两束光以正交偏振态传输), 由式 (1) 可推出对应的喇曼阈值约为 44.77 W.

图 1 给出了 1 kW 高功率脉冲在光纤中传输以

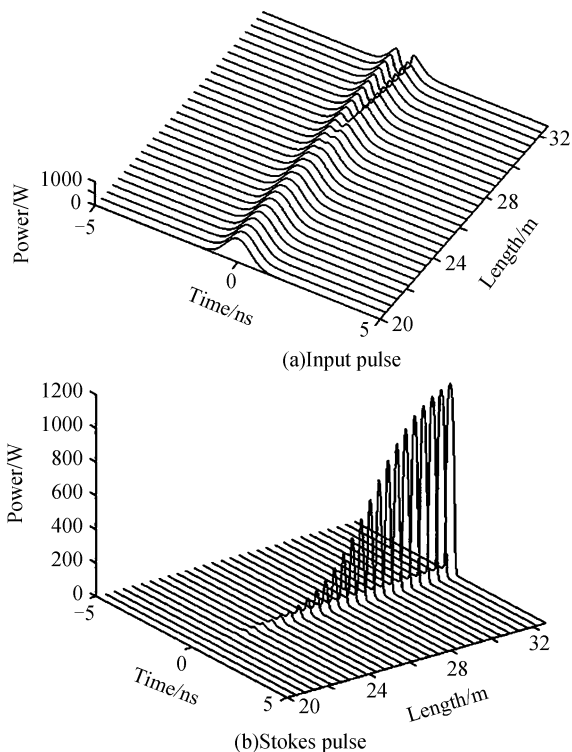


图 1 输入脉冲和 Stokes 光沿光纤传输时的波形演化
Fig. 1 Temporal evolution of input pulse and Stokes pulse along a single-mode fiber

及 Stokes 光产生的时域演化图. 可以看到, 输入脉冲因达到了喇曼阈值, 在传输过程中产生 Stokes 光. 开始时强度较小, 经过一段距离后, Stokes 光随传输距离的增加迅速增大, 甚至达到可以与输入脉冲比拟的程度, 同时输入脉冲中心部分出现凹陷, 并随着距离的增加逐渐加深. Stokes 光在增大到一定值之后, 开始出现饱和. 这是由于在受激喇曼散射过程中, 两光波之间发生了能量转移, 输入脉冲的部分能量转移到 Stokes 光上, 同时自身产生抽运消耗; 随着距离的增加, Stokes 光增强, 而输入脉冲强度不断减小, 直到降到喇曼阈值以下, 这一过程主要集中在脉冲的中心部分; 此时输入脉冲不再消耗, 增益为零, Stokes 光也不再获得能量. 达到饱和后两束光将各自在光纤中传输, 仅伴有损耗和自相位调制等效效应, 喇曼过程结束. 对应模拟的输入条件, 因输入功率高达 1 kW, 经计算, 喇曼过程开始到结束的距离为 32.63 m, 在很短的距离内, 输入的脉冲能量就会转移到 Stokes 光上.

SRS 是在自发喇曼散射基础上形成的, 只有对应于喇曼增益系数较大的频率分量建立最快, 接收到的抽运能量也最多且强度最大, 即所对应的频率分量具有优势. 石英光纤中喇曼增益 g_R 有一个很宽的频率范围 (达 40 THz), 在 13 THz 附近有一个峰值, 本文模拟中即考虑了这一区域. 在输出端得到的一级 Stokes 谱线, 与其对应输入脉冲的位置及强度, 如图 2.

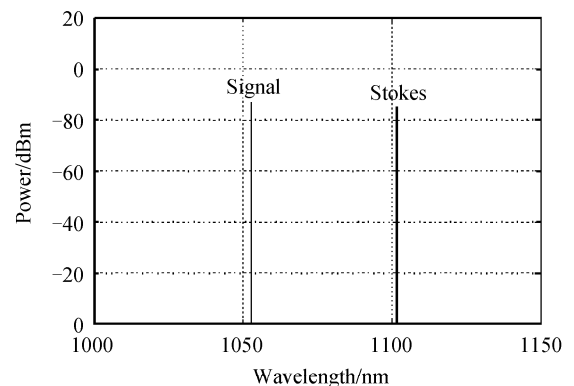


图 2 输入脉冲谱线与 Stokes 谱线
Fig. 2 Spectral lines of input pulse and Stokes pulse

实际中, 当提高输入脉冲功率时, 会激发多级 Stokes 光. 随着入纤功率的继续增大, 第一级 Stokes 光的能量也在增大. 当入纤功率的能量继续增大到第二级 Stokes 光的阈值时, 第二级 Stokes 光被激发, 第一级 Stokes 光的部分能量就转移到了第二级 Stokes 光上, 第二级 Stokes 光的能量随着第一级 Stokes 光能量的增加而增加. 当入纤功率再增加时, 按此规律依次激发高级 Stokes 光, 能量就由低级 Stokes 光依次向高级 Stokes 光传输. 所以

入纤功率越大,各级 Stokes 光的能量也越大,被激发的 Stokes 谱线级数也越高.

图 3 给出了达到阈值条件时输入脉冲和 Stokes 光的频谱. 由图可见,输入脉冲受自相位调制作用较强,出现振荡峰结构;而 Stokes 光没有出现振荡峰结构,这是由于 Stokes 光的迅速增长,在光纤中以较大光强传输的距离并不长,因此自相位调制效应较弱. 图 4 给出了同一条件下,考虑到包括 SPM、XPM 和 SRS 效应等非线性效应,高功率脉冲传输 1 km 后的波形和频谱. 由图可见,由于输入脉冲峰值功率较高,使自相位调制作用较强,频谱的振荡峰较多,但是没有出现很大的不对称性,交叉相位调制没表现出很大作用. 这是因为初始时入射脉冲较强,Stokes 光较弱,交叉相位调制项可忽略;但在传输过程中,入射脉冲功率的快速下降,Stokes 光的迅速增加,使得两光的强度在很短的距离内即出现强度可比拟的情况. 因而由输入光和 Stokes 光引起的交叉相位调制效应与自相位调制效应相当,对频谱没有什么影响. 同时因为入射脉冲中心部分的能量消耗,导致入射脉冲的输出频谱没有出现外层峰强度最大的典型自相位调制结构,这与之前的自相位调制性质不相矛盾,可以看到同一条件下 Stokes 光出现了这种结构.

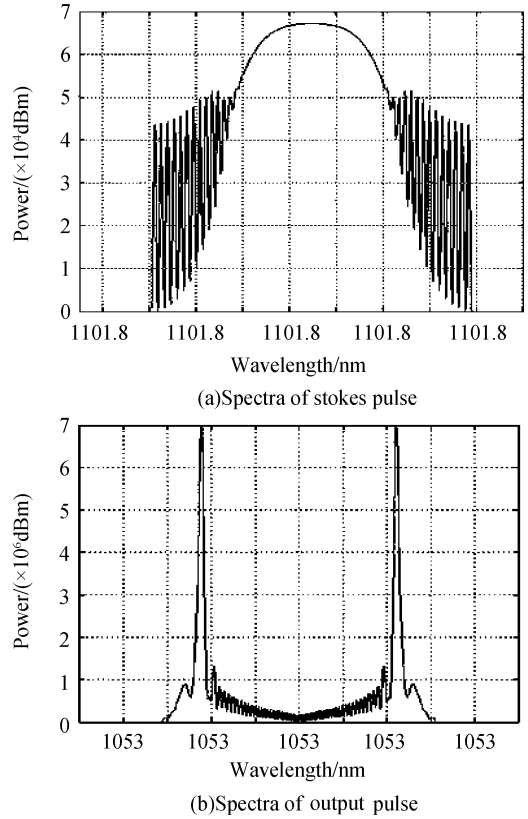


图 3 达到阈值条件时输出脉冲和 Stokes 光的频谱
Fig. 3 Spectra of output pulse and Stokes pulse when input power reaches Raman threshold

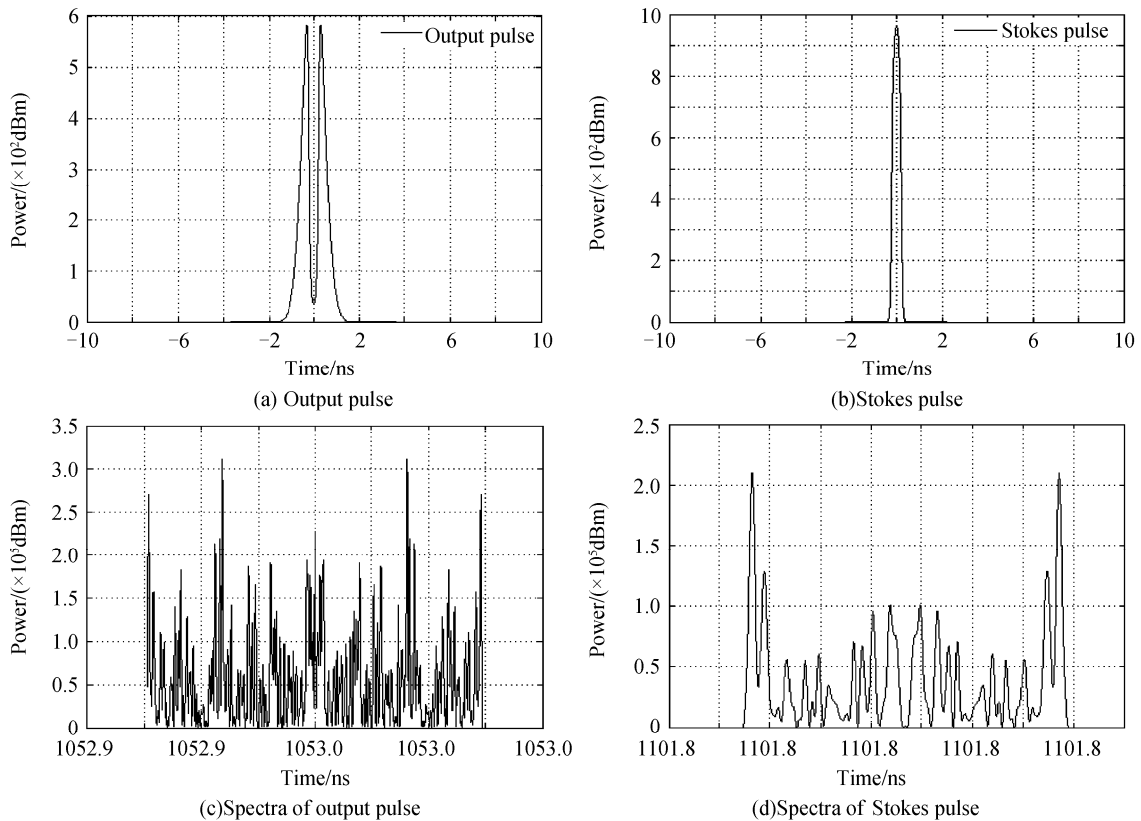


图 4 脉冲传输 1 km 后输出脉冲和 Stokes 光的波形和频谱
Fig. 4 Waveforms and spectra of output pulse and Stokes pulse when input pulse propagating in a 1 km-long fiber

此外,经计算可发现,输入高功率脉冲的啁啾对此传输过程并无太大影响. 这是因为传输过程中的

非线性效应很强,引起的啁啾很大,初始的输入啁啾对其来说可忽略不计.

2 大模面积光纤对 SRS 效应的抑制

光纤中的 SPM、SRS 和受激布里渊散射等非线性效应的功率阈值都会随着比值 $A_{\text{eff}}/L_{\text{eff}}$ 增加而增加. 增大模面积 A_{eff} 不仅可以使纤芯的光功率密度下降, 还可以提高 SRS 效应的阈值. 因此, 抑制 SRS 效应最直接的办法就是采用大模面积的光纤.

图 5 给出了输入脉冲分别在普通单模光纤 (Single Mode Fiber, SMF, $A_{\text{eff}} = 80 \mu\text{m}^2$)、大模面积光纤 (Large Mode Area Fiber, LMAF, $A_{\text{eff}} = 100 \mu\text{m}^2$) 和一种现有的光子晶体光纤 (Photonic Crystal Fibers, PCF, $A_{\text{eff}} = 530 \mu\text{m}^2$) 中传输时, 其光强随传输距离的变化情况. 显而易见, 在不同的模面积下, 各光纤的喇曼阈值有着明显不同, 信号的衰减程度也不相同. 同样的条件下, 喇曼阈值较高的大模面积光纤信号衰减较小, 同时互作用的时间较长. 图 6 分别给出了 $80 \mu\text{m}^2$ 、 $530 \mu\text{m}^2$ 模面积下信号脉冲的时域输出图. 可明显看出, $530 \mu\text{m}^2$ 大模面积光纤的信号衰减较小, 中心凹陷程度较低.

目前, 实际中相继设计了多种新型的大模面积光纤. 这些光纤通过改变纤芯、包层的折射率分布或增益分布, 调整结构参量, 在模面积、抗弯性能、高阶

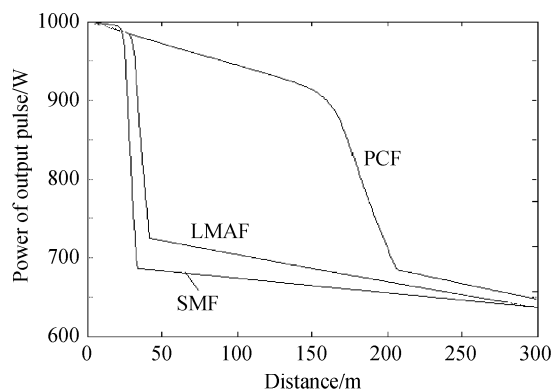


图 5 SMF、LMAF 和 PCF 光纤中入射脉冲光强随传输距离的变化

Fig. 5 Intensity of input pulse vs. transmission distance for SMF, LMAF and PCF

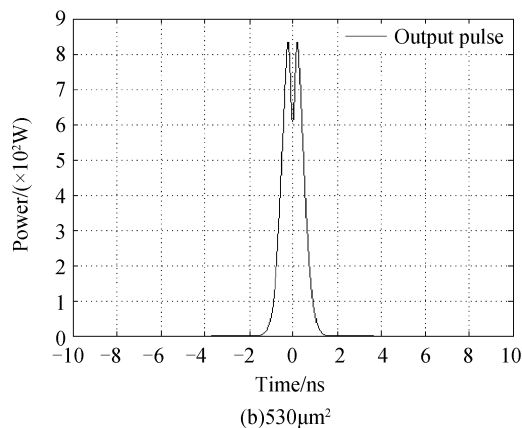
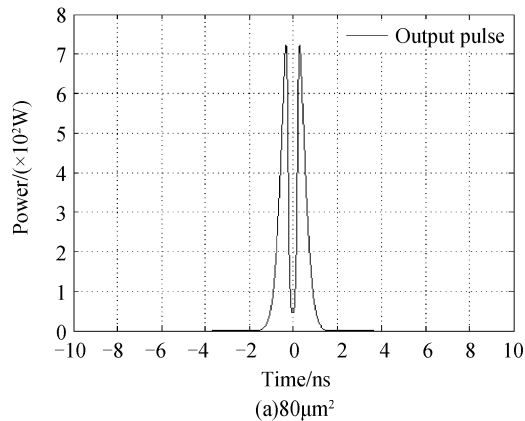


图 6 $80 \mu\text{m}^2$ 、 $530 \mu\text{m}^2$ 模面积下输出脉冲的波形

Fig. 6 Waveforms of output pulse for $80 \mu\text{m}^2$ and $530 \mu\text{m}^2$ mode field areas

模抑制能力、工作稳定性等因素之间做出合理折衷, 使模面积显著增加, 不但有效抑制了非线性效应的形成, 也具有很好的光束质量. 目前模面积最大已达到 $4\,500 \mu\text{m}^2$, 输出的脉冲峰值功率超过 6 MW.

尽管大模面积光纤的应用可以有效抑制 SRS 等非线性效应, 但其引申出的多模输出、模弯曲畸变严重、稳定性下降等问题, 目前仍未找到有效的控制方法, 所以需从理论和实验方面进一步探索非线性效应管理的新技术、新方法.

3 结论

本文以数值方法分析了在 ICF 脉冲整形系统中, 高功率脉冲 (波长为 $1\,053 \text{ nm}$ 、功率在千瓦级、脉宽在纳秒级) 在单模光纤中的 SRS 效应. 研究表明, 采用大模面积的光纤可以有效抑制 SRS 对脉冲传输质量的影响, 大模面积的 PCF 有可能成为 ICF 系统中理想的传输介质. 接下来的工作是开展相关的实验研究, 找到实际情况下控制 SRS 的有效方法, 为激光脉冲整形系统中最佳的非线性控制方案提供参考.

参考文献

- [1] WANG Jian-jun, LI Ming-zhong, DENG Qing-hua, *et al.* Polarization control technology of fiber front-end system in ICF driver[J]. *High Power Laser And Particle Beams*, 2006, **18**(5): 803-806.
王建军, 李明中, 邓清华, 等. ICF 驱动器光纤前端系统偏振控制技术[J]. *强激光与粒子束*, 2006, **18**(5): 803-806.
- [2] WANG Chun, CHEN Shao-he, MA Zhong-lin, *et al.* The realization of the arbitrary shaping of the laser pulse by the integrated optical modulator in the ICF solid-state laser driver [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2001, **18**(5): 411-415.
王春, 陈绍和, 马忠林, 等. 利用集成光学调制器实现 ICF 固体激光驱动器中激光脉冲任意整形[J]. *量子电子学报*, 2001, **18**(5): 411-415.

- [3] SHEN Lei, CHEN Shao-he, LIU Bai-yu, *et al.* New temporary pulse-shaping system using integrated optics technology [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(5): 598-603.
沈磊, 陈绍和, 刘百玉, 等. 利用集成光学技术的新型时间脉冲整形系统 [J]. *光学学报*, 2003, **23**(5): 598-603.
- [4] LIN Hong-huan, SUI Zhan, WANG Jian-jun, *et al.* Optical pulse shaping by chirped pulse stacking [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(3): 466-470.
林宏奂, 隋展, 王建军, 等. 啁啾脉冲堆积用于光脉冲整形 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(3): 466-470.
- [5] HU Zheng-liang, HU Yong-ming, ZHAO Ming-hui, *et al.* Analysis and simulation of optic fiber pulse stacker [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(7): 966-969.
胡正良, 胡永明, 赵明辉, 等. 光纤脉冲堆积器的模拟分析 [J]. *光子学报*, 2006, **35**(7): 966-969.
- [6] CHEN Fei, MENG Shao-xian. Damage of optical glass materials with 2 ns large aperture high power laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(10): 1362-1365.
陈飞, 孟绍贤. 2 ns 大口径高功率激光对光学玻璃材料破坏研究 [J]. *光学学报*, 1998, **18**(10): 1362-1365.
- [7] GU Jian-hui, LI Zai-guang, CHEN Shu-shu. Study on the interaction and dynamic process of high-power laser beams with material [J]. *Laser Journal*, 1992, **13**(2): 57-61.
辜建辉, 李再光, 陈殊殊. 高能激光与材料相互作用及其动力学过程研究 [J]. *激光杂志*, 1992, **13**(2): 57-61.
- [8] AGRAWAL G P. Nonlinear fiber optics & application of nonlinear fiber optics [M]. JIA Dong-fang, YU Zhen-hong, transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002.
AGRAWAL G. P. 非线性光纤光学原理与应用 [M]. 贾东方, 余震虹, 译. 北京: 电子工业出版社, 2002.
- [9] BARNARD C W, MYSLINSKI P, CHROSTOWSKI J. Limitations imposed by stimulated raman scattering of 1550 nm high-energy pulse transmission [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1995, **13**(2): 115-119.

Stimulated Raman Scattering and Its Suppression in a Single-mode Fiber Induced by High-power Nanosecond Optical Pulse

LI Ya-bin, JIA Dong-fang, PANG Song-tao, LIU Yang, ZHAO Chuan,
WANG Zhao-ying, GE Chun-feng, LI Shi-chen

(Key Laboratory of Opto-electronics Information and Technical Science, College of Precision Instrument and Opto-electronics, Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The influence of stimulated Raman scattering (SRS) on high-power (peak power $\sim 1\ 000\ \text{W}$) pulse with a pulse-width of $\sim 1\ \text{ns}$ propagating in a single-mode fiber is investigated numerically by solving coupled nonlinear Schrödinger equations including Raman gain, pump depletion, self-phase modulation, cross-phase modulation and group velocity dispersion. The evolution of input pulse and Stokes pulse is analyzed, and suppression of SRS using large mode area fiber is shown. The results show that SRS can be suppressed effectively when using photonic crystal fiber (PCF) as transmission medium for inertial confined fusion (ICF). Compared to conventional single-mode fiber, the signal loss is smaller, and the central-dip in output pulse is lower.

Key words: High-power nanosecond optical pulse; Stimulated Raman scattering; Large mode area fiber; Nonlinearity



LI Ya-bin was born in 1984. He is a M. S. degree candidate, and engaged in the research of stimulated raman scattering in communication system at Tianjin University.