

# 高功率光子晶体光纤放大器内超短脉冲的放大传输特性\*

张毓灵, 杨德兴<sup>†</sup>, 黄国玲, 赵建林

(西北工业大学 a. 理学院 光信息科学与技术研究所; b. 陕西省光信息技术重点实验室, 西安 710129)

**摘 要:** 由速率方程和功率传输方程得到信号脉冲平均功率和增益系数随脉冲传输距离的变化关系. 利用 Ginzburg-landau 方程, 在信号脉冲功率的不断增强和增益系数的不断变化的情况下, 研究超短脉冲的传输演化特性, 发现信号脉冲平均功率、能量和增益系数等参量受到色散和非线性效应的影响相对较小, 而信号脉冲的峰值功率、时域和频域特性则易受到色散和非线性效应的影响. 探讨了在非线性作用下, 脉冲分裂和展宽等所导致的脉宽不稳定性对传输特性的影响, 表明研究脉冲传输问题时, 引入脉宽不稳定性有利于提高数值模拟准确度.

**关键词:** 光子晶体光纤放大器; 速率方程; 增益系数; Ginzburg-landau 方程; 均方根脉宽

**中图分类号:** TN248.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2009)12-3220-6

## 0 引言

光子晶体光纤(Photonic Crystal Fiber, PCF), 是 20 世纪 90 年代由英国南安普顿大学 J. C. Knight 等<sup>[1]</sup>首次研制成功的一种新型光纤. 与传统光纤相比, 光子晶体光纤因其特殊的结构特征, 能够实现大模场单模传输, 因此非常适于制造高光束质量的高功率放大器和高功率激光器<sup>[2]</sup>. 近几年来, 国内外不断有研究机构刷新光纤放大器获得的最大脉冲功率<sup>[3-5]</sup>, 然而随着功率的不断提高, 光脉冲在传输过程中将难以避免地产生非线性效应<sup>[6-7]</sup>, 从而对脉冲的传输特性产生影响. 光脉冲放大过程中的传输特性与放大脉冲的输出质量紧密相关, 因此, 为改善高功率光纤放大器性能, 提高放大脉冲输出质量, 需要对光纤放大器内高功率脉冲的传输特性进行研究.

目前, 有关光纤放大器内的脉冲传输问题, 一般考虑的是不同输入输出功率下的脉冲传输特性<sup>[8-9]</sup>, 很少考虑在脉冲放大过程中, 功率的逐渐增强和增益系数的不断变化对脉冲传输特性的影响. 例如涂成厚等<sup>[10]</sup>在 2008 年研究自相似抛物脉冲光纤放大器中超短脉冲的演化特性时, 探讨了不同色散长度和增益系数对脉冲自相似演化的影响, 文中选取了不同的增益系数进行研究, 但是也未考虑放大脉冲演化过程中的增益系数变化所带来的影响.

本文通过光纤放大器的速率方程和功率传输方程得到信号光平均功率和增益系数沿光纤长度的分布, 在考虑信号光功率和增益系数随传输距离变化的情形下, 利用 Ginzburg-landau 方程研究信号脉冲在光纤放大器未稳定情况下的传输演化特性, 并通过分步傅里叶算法对整个传输过程进行数值模拟, 分析信号脉冲在色散和自相位调制、自陡效应及受激拉曼散射等非线性效应作用下的放大传输特性, 同时研究脉冲放大传输过程中由于脉冲展宽和分裂所致的脉宽不稳定对脉冲传输特性的影响.

## 1 超短脉冲的增益放大

与光纤激光器相似, 人们也采用速率方程和功率传输方程来描述 PCFA 内信号脉冲的增益放大过程. 本文采用掺 Yb<sup>3+</sup> 的光子晶体光纤作为光纤放大器增益介质, 其中信号脉冲的放大机理是通过泵浦光对光纤内的 Yb<sup>3+</sup> 进行泵浦抽运, 实现 Yb<sup>3+</sup> 上下能级的粒子数反转, 然后在特定频率信号脉冲作用下, Yb<sup>3+</sup> 通过受激辐射发生能级跃迁, 释放出与信号脉冲频率一致的光信号, 从而实现对信号光的增益放大.

所采用的光子晶体光纤长为 2 m, 且环绕纤芯具有三角结构排列的空气孔包层, 其中, 光纤纤芯直径  $r=26.4 \mu\text{m}$ , 空气孔直径  $d=0.2 \mu\text{m}$ , 空气孔间距  $\Lambda=3.8 \mu\text{m}$ . PCFA 采用的泵浦方式为双端泵浦, 泵浦光波长  $\lambda_p$  为 976 nm, 输入平均功率  $P_{p0}$  为 100 W; 信号光波长  $\lambda_s$  为 1 068 nm, 输入平均功率  $P_{s0}$  为 10 W. 忽略饱和效应和放大自发辐射效应, 通过求解稳态下的速率方程和功率传输方程<sup>[11-12]</sup>, 得

\* 瞬态光学与光子技术国家重点实验室开放基金和西北工业大学研究生创业种子基金(200864)资助

<sup>†</sup> Tel: 029-88431663

Email: dxyang@nwpu.edu.cn

收稿日期: 2009-01-08

修回日期: 2009-03-31

到信号光平均功率和增益系数沿着光纤传播轴的分布,结果如图 1.

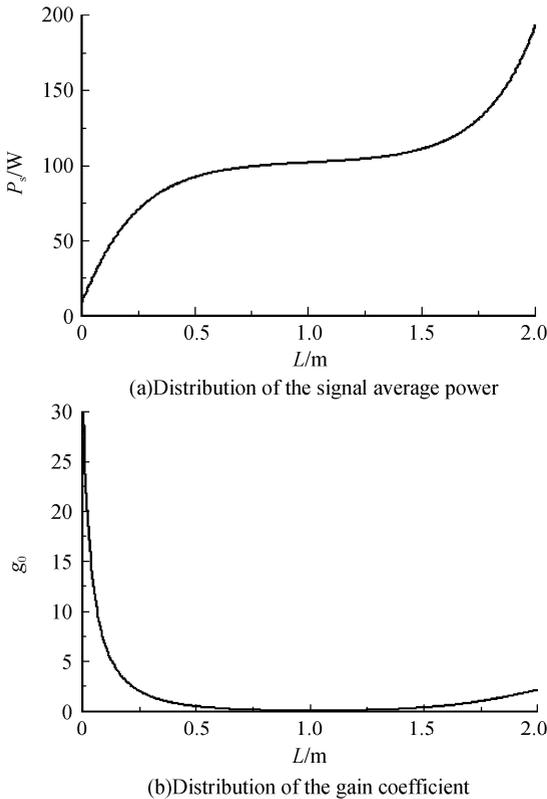


图 1 信号脉冲平均功率及增益系数沿光纤传播轴的分布  
Fig. 1 Distributions of the signal average power and the gain coefficient along the fiber transmission axis

在双端泵浦作用下,图 1(a)的信号脉冲平均功率在光纤前后两端附近有明显增长.这是由于光纤两端的泵浦功率较强,信号光平均功率有较大幅度增强,而在光纤中段则由于远离泵浦光,信号光平均功率的增幅相对平缓.图 1(b)是信号光增益系数沿光纤轴的分布.在脉冲传输的初始阶段,由于泵浦光功率与信号光功率比值较大,信号光增益系数较大.但随着传输距离的增加,信号光功率迅速增强,泵浦光功率与信号光功率比值变小,使得增益系数迅速减小,但在光纤末端泵浦光泵浦下,增益系数仍将具有小幅度的增大.

## 2 超短脉冲的传输特性

### 2.1 基本原理

选取信号脉冲包络为  $A(z, \tau) = \sqrt{P_0}U(z, \tau)$ , 式中  $U(0, \tau) = \text{sech}(\tau) = \text{sech}(T/T_0)$  为未考虑啁啾情况下的脉冲归一化形式,  $\tau = T/T_0 = (t - z/v_g)/T_0$  为归一化时间,  $P_0$  为信号脉冲的峰值功率. 因此单脉冲能量可以表示为

$$E_s(z) = \int |A(z, \tau)|^2 d\tau = \int |\sqrt{P_0}U(z, \tau)|^2 d\tau \quad (1)$$

式中  $P_0 = P_{s0}/(\gamma\omega_0 T_0)$  表示了信号脉冲峰值功率与

平均功率之间的关系, 式中系数  $\gamma$  取  $0.7^{[13]}$ ;  $\omega_0$  为脉冲重复频率, 取  $1 \times 10^9$  Hz;  $T_0 = [\langle T^2 \rangle - \langle T \rangle^2]$  为均方根脉宽. 信号脉冲的初始宽度取  $T_{00} = 0.6$  ps, 且  $T$  满足

$$\langle T^n \rangle = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} T^n |U(z, T)|^2 dT}{\int_{-\infty}^{\infty} |U(z, T)|^2 dT} \quad (2)$$

同时定义脉冲展宽因子  $LS = T_0/T_{00}$ . 很明显信号光的均方根脉冲宽度和脉冲展宽因子受到脉冲包络  $A(z, \tau)$  的影响, 均非常量, 且二者在脉冲的传输演变过程中均随脉冲包络而变化. 另外, 信号脉冲的初始脉宽  $T_{00}$  远大于光纤的极化弛豫时间  $T_2$  ( $\sim 0.002$  ps), 此时掺  $\text{Yb}^{3+}$  的 PCFA 内超短脉冲传输问题可以由 Ginzburg-landau 方程<sup>[14]</sup> 描述.

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial z} = & \frac{1}{2L_D} [i + g_0 L_D (\frac{T_2}{T_0})^2] \frac{\partial^2 U}{\partial \tau^2} + i \frac{\beta_3}{6|\beta_2|T_0 L_D} \cdot \\ & \frac{\partial^3 U}{\partial \tau^3} + \frac{1}{2} (g_0 - \alpha) U + i\gamma P_0 [|U|^2 U - \\ & \tau_R U \frac{\partial |U|^2}{\partial \tau} + i s \frac{\partial (|U|^2 U)}{\partial \tau}] \end{aligned} \quad (3)$$

式中,  $L_D = T_0^2/|\beta_2|$  为二阶色散长度,  $N = (\gamma P_0 L_D)^{1/2}$  为归一化非线性系数,  $s = \lambda_s/(2\pi c T_0)$  为自陡系数,  $\gamma$  为非线性系数,  $P_0$  为峰值功率,  $T_0$  为输入脉冲宽度,  $\beta_2$  二阶色散系数,  $\beta_3$  为三阶色散系数,  $\tau_R$  为受激拉曼系数,  $g_0$  为信号脉冲增益系数,  $\alpha$  为光纤传输损耗系数,  $c$  为光速. 对于超短脉冲来说, 一般可忽略饱和效应, 同时如果偏离零色散点传输时, 高阶色散的作用远比二阶色散影响小. 由于脉冲宽度、峰值功率及增益系数均沿光纤轴向发生变化, 二阶色散长度  $L_D$ 、归一化非线性系数  $N$ 、自陡系数  $s$  等均为与传输距离有关的参量. 因此在研究脉冲放大过程中的传输特性时, 均需考虑这些参量的变化给脉冲传输演化带来的影响.

### 2.2 脉冲传输过程的数值模拟

利用分步傅里叶算法求解方程(3), 所选取参量的值为:  $T_{00} = 0.6$  ps,  $\beta_2 = -6$  ps<sup>2</sup>/km,  $\beta_3 = 0.0605$  ps<sup>3</sup>/km,  $\gamma = 25$ /(W · km),  $\tau_R = 0.144$ ,  $\alpha = 0.1$ . 信号脉冲在实际 PCFA 内的放大传输过程中, 由于放大器未稳定, 信号光功率和增益系数随传输距离会不断变化, 此时脉冲传输特性与放大器最后稳定输出时存在较大差异. 另外由于信号脉冲功率不断增强及各阶色散和非线性的作用, 会造成脉冲在传输过程中出现展宽甚至分裂, 使得脉冲波形较初始状态发生较大变化, 从而造成脉冲宽度的不稳定. 脉宽的不确定性将导致与脉宽相关的传输参量不稳定, 从而对脉冲传输演化过程以及放大器最后

的脉冲输出产生较大影响. 而且, 由于脉冲传输连续性及非线性作用的累积效应, 光纤放大器脉冲增益放大过程中的传输特性将对光纤放大器放大脉冲的输出特性产生很大影响.

为此, 在数值模拟算法处理中, 首先将光纤分成若干小段来研究, 对于某一小段光纤内的脉冲传输, 选取与该小段光纤相对应的信号脉冲功率、增益系数及此时的均方根脉宽. 然后通过求解 Ginzburg-landau 方程可得到传输过该小段光纤后的脉冲传输特性, 进一步得到其归一化脉冲形式  $U(z, T)$ . 再根据式(2)可求得均方根脉宽并将其作为下一小段光纤的脉冲初始宽度, 并修改与脉宽相关的传输参量值, 如将新的脉冲宽度代入自陡系数  $s$ 、二阶色散长度  $L_D$  等参量的表达式以得到其新的值. 同时根据图 1 选取相应光纤位置处的信号脉冲平均功率  $P_0$  和脉冲增益系数  $g_0$ , 继续求解 Ginzburg-landau 方程得到该段光纤内的脉冲传输特性. 如此逐段计算, 可以在光纤放大器信号脉冲功率不断增强、增益系数和均方根脉宽不断变化下, 研究信号脉冲的整个传输演化过程, 可以得到光纤任何长度处信号脉冲时域和频域的谱特性及该处相应的平均功率、峰值功率、脉冲能量及脉冲展宽因子, 从而得到光纤放大器放大过程中信号脉冲较为完整和精确的传输特性.

图 2 显示了信号脉冲沿着光纤轴向的传输演化过程, 图 3 为相应脉冲放大传输过程中的频谱分布. 由图 2 可以看出信号脉冲放大传输的初始阶段, 脉冲宽度基本保持不变, 且由于泵浦光较强, 信号光较弱, 信号光增益系数较大, 使得信号脉冲迅速得到放大. 由图 3 可以看到, 在传输距离为 0.8 m, 信号光平均功率为 96.4 W 时, 脉冲频谱在自相位调制作用下发生分裂. 随着传输距离的增加, 泵浦光不断被吸收, 信号光增益系数不断减小, 信号光功率大幅度变缓, 但由于脉冲传输的连续性及其自相位调制等非线性效应的累积效果使得信号脉冲频谱继续分

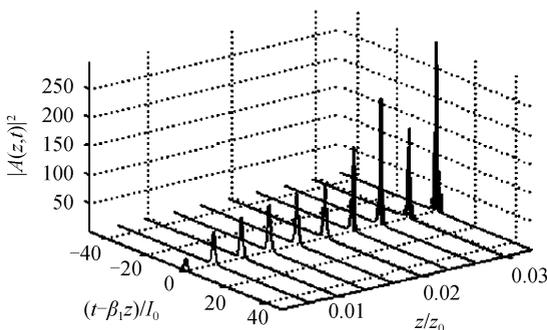


图 2 信号脉冲的放大传输演化  
Fig. 2 Temporal evolution of the signal pulse

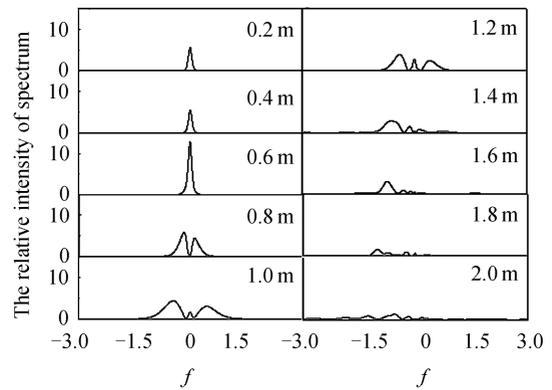


图 3 信号脉冲的放大传输过程中的频谱  
Fig. 3 Spectral evolution of the signal pulse with its amplification

裂. 在传输距离为 1.4 m, 信号光平均功率为 107.9 W 时, 由于受激拉曼效应的作用, 脉冲频谱出现显著的频移现象, 相应的信号脉冲则不断出现精细结构. 当接近光纤末端时, 受到光纤末端泵浦的影响, 信号光平均功率仍将得到进一步放大, 脉冲频谱也得到更大展宽.

由图 4 可以看出, 随着信号脉冲在光纤放大器中的不断增益放大, 脉冲功率不断增强, 使信号脉冲在传输过程中产生非线性效应, 而且非线性效应随着功率的增大不断增强, 脉冲展宽因子已由最初的相对稳定逐渐发生变化. 在传输距离 1.4 m 处, 由于非线性效应的作用, 特别是受激拉曼效应的作用使得信号脉冲出现分裂和红移, 导致其均方根脉宽迅速增大, 相应的脉冲展宽因子也快速增大. 而脉冲宽度的迅速变化, 使脉冲传输过程中与脉宽相关的参量变得不稳定, 如二阶色散长度  $L_D$ 、自陡系数  $s$  等. 特别是  $L_D$  的不稳定, 将造成色散和自相位调制在脉冲传输过程中谁起主导作用的关系变得不确定, 产生调制非稳, 使脉冲更易展宽分裂, 从而在一定程度上增强了非线性效应, 降低了信号光强度.

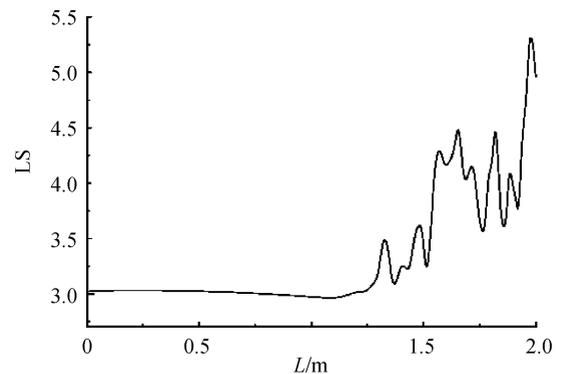


图 4 信号脉冲展宽因子  
Fig. 4 Broadening factor of the signal pulse versus the fiber length

图 5(a)描述了信号脉冲峰值功率沿光纤传播轴向的分布情况. 由于信号脉冲为超短脉冲,脉宽为皮秒量级,因此峰值功率较大. 在脉冲放大传输过程中,由于非线性效应及各阶色散的联合作用,会造成信号脉冲均方根脉宽的变化,从而导致脉冲峰值功率变得不稳定. 图 5(a)可以看到,在脉冲传输距离为 1.4 m 以后,信号脉冲展宽因子不稳定,对应脉冲均方根宽度不稳定,使得相应位置处的脉冲峰值功率出现振荡. 但是由于存在脉冲的增益放大,此时脉冲的峰值功率仍能维持一较大的值. 因此信号光脉冲的峰值功率在传输过程中受到色散和非线性效应的影响相当大,在考虑脉冲质量时,很有必要考虑非线性效应对脉冲峰值功率的影响.

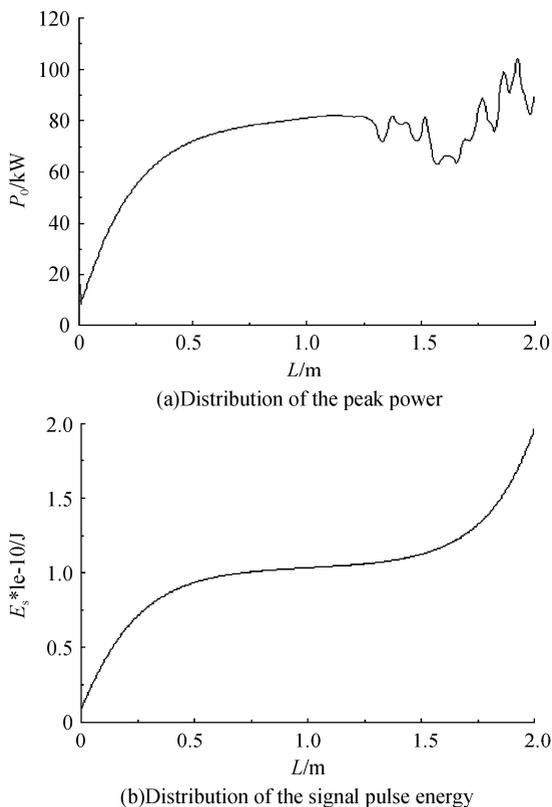


图 5 信号脉冲峰值功率及信号脉冲能量沿光纤传播轴的分布

Fig. 5 Distributions of the peak power and the signal pulse energy along the fiber transmission axis

图 5(b)则描述了信号脉冲在放大传输过程中脉冲能量沿光纤传播轴向的分布情况,图 5(b)的信号脉冲能量是在脉冲放大传输过程中对其复振幅在时域内积分所得. 由于光纤放大器内信号脉冲的增益放大主要是由泵浦光对光纤放大器内的  $\text{Yb}^{3+}$  粒子的抽运跃迁来实现的,并由速率方程和功率传输方程来描述,受到传输过程中的色散和非线性效应的影响较小. 图 5(b)中信号脉冲能量沿光纤传播轴的分布情况与由速率方程和功率传输方程得到的信号脉冲平均功率沿光纤传播轴的分布情况(图 1

(b))相当一致.

用于研究 PCFA 内脉冲的放大传输特性的速率方程和 Ginzburg-landau 方程中包含的参量较多,因此在实际数值计算中,选取了若干组不同的系统参量进行计算比较. 如在特定初始输入条件下,选取不同结构的光纤和不同的传输参量;或在同一光纤结构下,选取不同初始输入条件,包括信号光和泵浦光初始功率、初始脉宽等. 模拟结果显示,虽然放大脉冲的传输特性会因为系统参量的差异而有所差别,然而还是可以看到内在的规律性. 由于篇幅的限制和文章结构的考虑,仅给出一组与实际接近,且较为典型的参量条件下的数值模拟结果. 可以发现信号脉冲在 PCFA 内放大传输过程中,信号脉冲的增益放大特性主要是由速率方程和功率传输方程的泵浦特性决定,比如信号脉冲平均功率、增益系数和脉冲能量等参量受到色散和非线性效应的影响就相对较小. 信号脉冲的峰值功率、时域和频域特性与脉冲波形相关,脉冲功率较高时,在色散和非线性效应作用下,脉冲容易分裂和展宽,使得脉冲均方根宽度发生变化,导致与脉宽相关的传输参量的不稳定,加剧了脉冲的分裂和频谱的扩展,增强了非线性效应,从而对放大脉冲质量产生不利的影响. 而脉冲传输过程中,在非线性作用下,如果不是孤子,脉宽的不稳定性将难以避免,它通过与其相关的传输参量将对脉冲的传输演化产生影响,因此在研究脉冲传输时,引入脉宽不稳定性有利于提高数值模拟准确度.

### 3 结论

利用泵浦光在掺  $\text{Yb}^{3+}$  的 PCFA 中对信号脉冲进行抽运放大,并通过速率方程得到信号脉冲功率和增益系数随着脉冲传输距离的变化关系. 进而利用 Ginzburg-landau 方程,并通过考虑信号光功率、增益系数和脉冲宽度随着传输距离的变化来研究其放大传输特性. 发现光纤放大器中信号脉冲的放大主要由泵浦光抽运来实现,并可以由速率方程和功率传输方程描述. 脉冲传输过程中的非线性效应对放大脉冲的增益系数、平均功率和脉冲能量的影响较小,但对脉冲质量,特别是对脉冲峰值功率和脉冲时域及频域的谱特性等传输特性影响较大. 脉冲宽度的不稳定增强了非线性效应,加剧脉冲的展宽和分裂,从而对脉冲传输特性产生较大影响. 因此,通过分析和研究光纤放大器脉冲放大过程中的传输特性,揭示了脉冲宽度的不稳定对脉冲质量的不利影响,为研制具有高质量放大脉冲输出的新型高功率光纤放大器提供了一定的理论依据.

## 参考文献

- [1] KNIGHT J C, BIRKS T A, RUSSELL P ST J, *et al.* All silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding[J]. *Opt Lett*, 1996, **21**(19):1547-1549.
- [2] ZHAO Zhen-yu, DUAN Kai-liang, WANG Jian-ming, *et al.* Experimental study of characteristics of high power photonic crystal fiber amplifier[J]. *Acta Phys Sin*, 2008, **57**(10):6335-6339.  
赵振宇, 段开棕, 王建明, 等. 高功率 PCFA 实验研究[J]. 物理学报, 2008, **57**(10):6335-6339.
- [3] FABIO DI TEODORO, CHRISTOPHER D BROOKS. Multi-MW peak power, single transverse mode operation of a 100 micron core diameter, Yb-doped photonic crystal rod amplifier [C]. *SPIE*, 2007, **6453**:18:1-5.
- [4] CHRISTOPHER D BROOKS, FABIO DI TEODORO. High peak power operation and harmonic generation of a single-polarization, Yb-doped photonic crystal fiber amplifier [J]. *Opt Commun*, 2007, **8**(40):424-430.
- [5] YANG Ling-zhen, WANG Yun-cai, CHEN Guo-fu, *et al.* Experimental Study on Ultrashort Pulse Ytterbium-Doped Fiber Amplifier[J]. *Acta Photonic Sinica*, 2008, **37**(3):223-226.  
杨玲珍, 王云才, 陈国夫, 等. 超短脉冲掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤放大器实验研究[J]. 光子学报, 2008, **37**(3):223-226.
- [6] PENG Run-wu, GUO Lin, ZHANG Xiao-fu, *et al.* Picosecond laser amplification system with 93W high average power[J]. *Opt Commun*, 2008, **281**(10):2879-2889.
- [7] AKIRA SHIRAKAWA, JUN OTA, MITSURU MURASHI, *et al.* Large-mode-area erbium-ytterbium-doped photonic-crystal fiber amplifier for high-energy femtosecond pulses at 1.55 $\mu$ m [J]. *Opt Express*, 2005, **13**(4):1221-1227.
- [8] ADEL P, ENGELBRECHT M, WANDT D, *et al.* Resonant nonlinearity in high-energy Er<sup>3+</sup>-fiber chirped-pulse-amplifiers [J]. *Opt Express*, 2005, **13**(25):10260-10265.
- [9] LIPING CHANG, WEI FAN, JIALIN CHEN, *et al.* High power pulse amplification of ytterbium-doped double-clad fiber amplifier[J]. *Chinese Opt Lett*, 2007, **5**(11):624-627.
- [10] TU Cheng-hou, LEI Ting, ZHU Hui, *et al.* The Ultra-short Pulse Evolution Characteristic in Self-similar Parabolic Pulse Fiber Amplifier[J]. *Acta Photonic Sinica*, 2008, **37**(5):779-882.  
涂成厚, 雷霆, 朱辉, 等. 自相似抛物脉冲光纤放大器中超短脉冲的演化特性[J]. 光子学报, 2008, **37**(5):779-882.
- [11] WU Zi-lu, CHEN Guo-fu, WANG Xian-hua, *et al.* Numerical analysis of Yb<sup>3+</sup> doped double clad fiber laser [J]. *Acta Photonic Sinica*, 2002, **31**(2):332-336.  
武自录, 陈国夫, 王贤华, 等. 掺 Yb<sup>3+</sup> 双包层光纤激光器的数值分析[J]. 光子学报, 2002, **31**(2):332-336.
- [12] WANG Yu-hai, MA Chun-sheng, LI De-lu, *et al.* Theoretical analysis on gain characteristics of ytterbium-doped fiber amplifier[J]. *Acta Photonic Sinica*, 2008, **37**(5):855-859.  
汪玉海, 马春生, 李德禄, 等. 掺 Yb<sup>3+</sup> 双包层光纤放大器增益特性的理论分析[J]. 光子学报, 2008, **37**(5):855-859.
- [13] HU Ming-lie. Study on propagation of femtosecond laser pulses in photonic crystal fibers [D]. Tianjian: Tianjian University, 2004:40-40.  
胡明列. 飞秒激光脉冲在光子晶体光纤中传输特性的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2004:40-40.
- [14] AGRAWAL G P. Nonlinear fiber optics & applications of nonlinear fiber optics[M]. JIA Dong-fang, YU Zhen-hong, *et al.*, transl. 3rd ed. Beijing: Electronics Industry Press, 2002:382-397.  
阿戈沃 G P. 非线性光纤光学原理及应用[M]. 贾东方, 余震虹, 等, 译. 3 版. 北京: 电子工业出版社, 2002:382-397.

## Amplification and Propagation of Ultrashort Pulse in High Power Photonic Crystal Fiber Amplifier

ZHANG Yu-ling, YANG De-xing, HUANG Guo-ling, ZHAO Jian-lin

(a. Institute of Optical Information Science and Technology, School of Science; b. Shaanxi Key Laboratory of Optical Information Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

**Abstract:** The dependences of the signal pulse average power and gain coefficient on the distance are obtained by using the rate equations and power propagation equations, and the Ginzburg-landau equation is employed to study the propagation of the ultrashort pulse. The results show that parameters such like signal pulse average power, energy and gain coefficient are not susceptible to the dispersion and nonlinear effect, while signal pulse peak power, and the characteristics of time and frequency domain are easy to be affected by the dispersion and nonlinear effect. The instability of pulse width caused by pulse splitting and broadening and the effect of the instability on pulse propagation are analyzed and discussed under the consideration of the nonlinear effect. It reveals that the accuracy of numerical simulation can be improved by introducing the pulse width instability in the study of the pulse propagation.

**Key words:** Photonic crystal fiber amplifier; Rate equations; Gain coefficient; Ginzburg-landau equation; RMS pulse width



**ZHANG Yu-ling** was born in 1982. He received his B. S. degree from Department of Applied Physics, Northwestern Polytechnical University (NPU) in 2004. He is currently working toward his M. S. degree at Shaanxi Key Laboratory of Optical Information Technology in NPU, and his research interests focus on the propagation of pulse in fiber amplifier.