

# 光纤参量放大器中饱和效应对快慢光的影响

桂 林<sup>1,2</sup> 邵宇丰<sup>1</sup> 周志彬<sup>2</sup> 余慧敏<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 上海第二工业大学电子与电气工程学院, 上海 201209)  
(<sup>2</sup> 湖南师范大学物理与信息科学学院, 湖南 长沙 410081)

**摘要** 在光纤参量放大器中,由于强抽运光与信号光的相互作用,四波混频效应引入的非线性折射率随频率发生变化,从而导致光波群速度的减慢或加快。通过分析影响四波混频效应引入的折射率变化的各个参数,研究了饱和效应对快慢光的影响。通过龙格库塔方法数值求解非线性耦合方程组,对比低入射功率和高入射功率下,信号光的解析结论与数值结论差异,得到了抽运光饱和效应对信号光延时影响较大的区域,即光纤参量放大增益谱带边缘区域。在完整模型条件下,分析了抽运光功率和光纤长度选择对快慢光的影响。这些结论对认识光纤参量放大器中的快慢光现象有重要帮助。

**关键词** 非线性光学;快慢光;光纤参量放大器;四波混频;饱和效应

**中图分类号** O437.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.s105016

## Influence of Saturation Effect on the Optical Signal Group Velocity in Fiber Optical Parametric Amplifier

Gui Lin<sup>1,2</sup> Shao Yufeng<sup>1</sup> Zhou Zhibin<sup>2</sup> Yu huimin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> School of Electronics and Electrical Engineering, Shanghai Second Polytechnic University, Shanghai 201209, China

<sup>2</sup> School of Physics and Information Science, Hunan Normal University, Changsha, Hunan 410081, China

**Abstract** In fiber optical parametric amplifier, the nonlinear index induced by four-wave mixing effect varies with the frequency owing to the interaction between the strong pump wave and signal wave so that the group velocity of optical wave slows down or accelerates. Based on the analysis of parameters in the process of index change induced by the four-wave mixing in fiber, the influence of saturation effect of pump wave on the delay time of signal wave is investigated. By solving the nonlinear equation based on Runge-Kutta method, the results of analytical method and numerical method are compared when low power and high power signal waves are injected into the fiber, and the region with large difference is obtained. This region is located in the band edge of the spectrum of fiber optical parametric amplifier. These results are conducive to know the slow and fast light phenomenon in fiber optical parametric amplifier.

**Key words** nonlinear optics; slow and fast light; fiber optical parametric amplifier; four-wave mixing; saturation effect

**OCIS codes** 190.4380; 190.4410

## 1 引 言

光波在色散介质中的传播规律是光学规律中的重要组成部分,而色散介质中光波群速度的减慢(慢光)与加快(快光)现象吸引着许多研究人员探索其

中的规律。近十多年来,随着人们对光波在色散介质中传播时群速度变化规律的探索和各种光电子器件制作水平的提高,研究人员提出了大量有关光波群速度测量与控制的方案。人们在电磁诱导透

收稿日期: 2013-10-09; 收到修改稿日期: 2013-11-18

基金项目: 国家自然科学基金(61107064)、湖南省自然科学基金(11JJ6053)、上海第二工业大学校级重点学科(通信与信息系统)第四期建设(XXKZD1302)

作者简介: 桂 林(1981—),男,博士,讲师,主要从事光通信器件、全光信号处理、光纤参量放大等方面的研究。

E-mail: guilin100@yeah.net(通信联系人)

明<sup>[1-3]</sup>(EIT)、相干粒子数振荡<sup>[4-5]</sup>(CPO)、光纤中受激布里渊散射<sup>[6]</sup>(SBS)、受激拉曼散射<sup>[7]</sup>(SRS)、四波混频<sup>[8,9]</sup>(FWM)等效应中均观察到了光波群速度加快与减慢现象,但是延时量级有所不同。同时,人们在光子晶体波导<sup>[10]</sup>与微环谐振腔<sup>[11]</sup>等依靠结构色散调谐光波群速度的方案中,也观察到了显著的快慢光现象。

光波非线性放大是另一种重要的光波群速度调控方法,有关该方法产生快慢光的解释通常为:非线性放大过程使信号光产生了增益,依据 KK (Kramers-Kronig)关系,增益的变化必然导致信号光的折射率随频率的变化,即形成色散介质,从而导致信号光群速度的变化。它在现象上表现为信号光的归一化波形出现延时或者超前。根据此原理,人们希望在所有能够提供非线性放大的效应中观察到快慢光现象。2005年, Song 等<sup>[12]</sup>利用光纤中的 SBS 效应放大窄带信号光来减慢光速。实验中半峰全宽为 100 ns 的光脉冲通过光纤时间延迟了 30 ns 左右,信号光的增益也达到了 30 dB。SBS 较窄的增益谱不仅提供了放大作用,也提供了信号光延时可调谐的机理。于是,人们便思考在其他的光放大中是否能出现类似于 SBS 中的快慢光现象。康奈尔大学 Sharping 等<sup>[7]</sup>在 1 km 高非线性光纤 (HNLF)中通过 SRS 效应实现了飞秒量级输入激光的光功率可调谐延时。几乎在同时,以色列 Technion 大学的研究者提出了利用窄带光纤参量放大器 (FOPA) 的增益谱实现信号光延时的方案<sup>[8]</sup>,当采用 2 km 高非线性光纤时,信号光延时达到了 161.5 ps。这些实验研究证实了非线性光放大过程中快慢光的存在,但是快慢光在一些复杂的非线性光学过程中的演化规律还需要进行深入的理论研究。

由四波混频为主要机理的 FOPA,不仅具有产生宽带快慢光的潜力,其本身的性能也会受到光波群速度的影响。例如,最新理论研究表明四波混频的效率与信号光、抽运光和闲散光的光波群速度密切相关<sup>[13]</sup>。于是一些研究人员针对这种新型的快慢光机理进行了研究,得到了一些与 SBS 中产生的快慢光不同的性质。该类性质主要包括<sup>[14-16]</sup>: 1) FOPA 不仅延时量与抽运光功率有关,产生快慢光的波长也会随着抽运光功率的变化而变化; 2) FOPA 的最大延时与最大增益波长并不重合; 3) FOPA 的增益谱边带可以出现近似零增益的极大快慢光。这些研究从理论上推论出光纤参量放大器中

快慢光的一些新现象。

由于以上理论分析主要基于小信号近似的解析解进行,当光纤长度较长或者抽运光较弱时,上述结论可能有所差异。因此,本文在上述研究基础上,着重研究 FOPA 中抽运光饱和对信号光延时的影响。这些研究不仅能够深入认识光纤参量放大器中的快慢光特性,还将有助于理解快慢光现象在四波混频这种光学非线性过程中的作用。

## 2 FOPA 中快慢光机理分析

FOPA 中的非线性过程以四波混频为主,并辅助有自相位调制、交叉相位调制等三阶光学非线性过程。在参量过程中,由于光纤中的四波混频效应,信号光波在放大的同时会产生延时。在这个过程中,光纤中 SRS 效应和偏振模式色散 (PMD) 都会影响四波混频的产生<sup>[8,17]</sup>,因此它们将会影响 FOPA 中的快慢光产生。根据 Dahan<sup>[8]</sup>和 Willinger 等<sup>[14]</sup>研究的结论,窄带 FOPA (抽运光波长位于正常色散区,且整个光纤的四阶色散为负值)的快慢光实现方案中,对快慢光的产生有贡献的效应包括: SRS 和 FWM。但是此类 FOPA 中信号光波长远离光通信波段。利用 FOPA 产生光通信波段快慢光时,信号光与抽运光的波长间隔往往较小,例如,二者的波长间隔在 1 THz 之内,因此它们可以同时位于光通信波段。假设它们同时位于光通信的 C 波段,根据文献<sup>[14]</sup>中图 11 对 SRS 影响宽带 FOPA 中快慢光的分析,在抽运光波长两侧的 15 nm 范围内, SRS 对快慢光产生的影响较小,可以忽略其影响。本文仅仅研究信号光与抽运光同时位于光通信波段的宽带 FOPA 中快慢光现象,因此理论模型中不包含 SRS 的影响。

利用光纤参量放大器实现快慢光需要选择合适的光纤,普通的单模光纤零色散波长位于 1310 nm 附近,不适合在光通信波段产生四波混频效应;高非线性光纤的零色散波长在 1550 nm 附近,且能够在该区域提供较大的非线性,是进行光放大的理想介质,但是在此种光纤中零色散波长的漂移十分严重;非零色散位移光纤 (NZ-DSF) 的零色散波长也在 1550 nm 附近,且相对波长漂移较小,因此,目前大多数 FOPA 中的快慢光实验是在 NZ-DSF 中实现的<sup>[8-9]</sup>。由此可见零色散波长的漂移对快慢光的影响非常大。除此以外,光纤中随机的偏振模色散将会使抽运光、信号光和闲散光的相位和偏振态发生不确定变化,最终使光波的耦合变的复杂,这将导致

FOPA 中延时时间随机变化。在 FOPA 慢光现象的研究中,为了突出慢光的基本特性,揭示 FOPA 中最终的延迟能力,采用简化的 FOPA 模型。即忽略所有光波偏振态沿光纤的变化,假设它们都是线

性同偏振的,零色散波长沿光纤的漂移和拉曼效应都不考虑。

在该模型中,非线性项的起因是光学克尔效应,它所引入的折射率变化  $\Delta n_{\text{kerr}}$  可以表示为

$$\Delta n_{\text{kerr}}(\omega) = \frac{n_2}{A_{\text{eff}}} \{ |A_s|^2 + 2 |A_p|^2 + 2 |A_i|^2 + (A_p^2 A_i^* / A_s) \exp[-i\Delta k(\omega)z] \}, \quad (1)$$

式中  $A_p$ 、 $A_s$  和  $A_i$  分别为抽运光、信号光和闲频光的复包络。 $\omega_s$ 、 $\omega_i$  和  $\omega_p$  分别为信号光波、闲散光波和抽运光波的角频率。 $A_{\text{eff}}$  是有效的模场面积, $n_2$  是材料中的克尔非线性系数。假设  $\omega_s$  处的波矢为大小  $k_s(\omega_s)$ ,  $\omega_i$  处的波矢大小为  $k_i(\omega_i)$ ,  $\omega_p$  处的波矢大小为  $k_p(\omega_p)$ ,  $\Delta k(\omega)$  为线性传播常数失配,它的表达式为

$$\Delta k(\omega_s) = k_s(\omega_s) + k_i(\omega_i) - 2k_p(\omega_p). \quad (2)$$

根据文献[18]中的分析方法,将(2)式中  $k_s(\omega_s) - k_p(\omega_p)$  和  $k_i(\omega_i) - k_p(\omega_p)$  两项分别在  $\omega_p$  处按照泰勒级数展开,则偶数项加倍,奇数项抵消, $\Delta k(\omega)$  可以表示为

$$\Delta k(\omega_s) = \beta_2 (\omega_s - \omega_p)^2 + \beta_4 (\omega_s - \omega_p)^4 / 12, \\ \omega_{s0} - \pi B \leq \omega_s \leq \omega_{s0} + \pi B, \quad (3)$$

式中  $\omega_{s0}$  是信号光的中心角频率, $B$  是带宽,色散参数  $\beta_2$  和  $\beta_4$  分别为  $\beta$  在  $\omega_p$  处的二阶和四阶导数<sup>[18]</sup>。假设  $\alpha$  是光纤中的损耗系数, $L$  是光纤的长度。 $P_p$ 、 $P_s$  和  $P_i$  分别是抽运光功率、信号光功率和闲频光功率。对于连续光而言, $\partial P_s(\omega) / \partial \omega \approx 0$ ,  $\partial P_p(\omega) / \partial \omega \approx 0$ ,  $\partial P_i(\omega) / \partial \omega \approx 0$ 。其中, $P_s(\omega) = |A_s(\omega)|^2$ ,  $P_p(\omega) = |A_p(\omega)|^2$ ,  $P_i(\omega) = |A_i(\omega)|^2$ 。因此,(1) 式中的自相位调制和交叉相位调制仅仅引入与频率无关的折射率增量,克尔效应引入与频率相关的折射率增量,主要表现为四波混频项  $(A_p^2 A_i^* / A_s) \exp[-i\Delta k(\omega)z]$  的贡献。该项是产生增益(损耗)和快慢光的根源。对于信号光而言, $(A_p^2 A_i^* / A_s) \exp[-i\Delta k(\omega)z]$  的实部导致信号光的相位变化,而虚部导致信号光的增益发生变化。令  $(A_p^2 A_i^* / A_s) \exp[-i\Delta k(\omega)z]$  的实部和虚部为  $F_{-\varphi}$  和  $F_{-g}$ , 它们可表示为

$$F_{-\varphi} = \frac{|A_p|^2 |A_i|}{|A_s|} \cos(2\varphi_p - \varphi_i - \varphi_s - \Delta k z), \quad (4)$$

$$F_{-g} = \frac{|A_p|^2 |A_i|}{|A_s|} \sin(2\varphi_p - \varphi_i - \varphi_s - \Delta k z), \quad (5)$$

式中  $\varphi_p(z)$ 、 $\varphi_s(z)$  和  $\varphi_i(z)$  分别为抽运光、信号光和闲散光在传输过程中的相位。令  $\Delta\varphi(z) = 2\varphi_p(z) - \varphi_s(z) - \varphi_i(z)$ , 则  $\Delta\varphi$  由抽运光、信号光和闲散光在传输过程中的相位差决定,且随着传输距离的变化而改变。由于线性传播常数失配  $\Delta k$  是频率的函数,因此  $F_{-\varphi}$  和  $F_{-g}$  均与频率相关,即四波混频效应引入的折射率改变和增益改变均随频率变化而变化。四波混频效应产生的增益改变与频率的相关性已经被大量实验证明,有关这方面的研究已经较为深入,而此类非线性效应将引入色散则是一个新的问题,在机理上还需要深入研究。由于四波混频引入了色散效应,因此光波群速度改变,即快慢光现象将会存在于四波混频这类非线性效应中。

### 3 饱和效应影响快慢光的原因分析

由于光纤中的损耗很小,忽略放大过程中的光纤损耗,则由光放大前后光功率守恒可得

$$|A_p|^2 + |A_s(\Delta\omega)|^2 + |A_i(-\Delta\omega)|^2 = |A_{p0}|^2 + |A_{s0}|^2, \quad (6)$$

式中  $\Delta\omega = \omega_s - \omega_p$ , 假设放大过程中信号光的增益为  $G(\Delta\omega)$ , 则有

$$|A_s(\omega)|^2 = G(\Delta\omega) |A_{s0}|^2, \quad (7)$$

$$|A_i(\omega)|^2 = [G(-\Delta\omega) - 1] |A_{s0}|^2. \quad (8)$$

由于光纤参量放大器在忽略受激拉曼散射效应后增益谱具有对称性, $G(\Delta\omega)$  满足如下关系:

$$G(\Delta\omega) = G(-\Delta\omega). \quad (9)$$

由(6)~(9)式可得

$$|A_p|^2 = |A_{p0}|^2 + 2[1 - G(\Delta\omega)] |A_{s0}|^2, \quad (10)$$

将(7)~(9)式代入(4)式和(5)式可得

$$F_{-\varphi} = \{ |A_{p0}|^2 + 2[1 - G(\Delta\omega)] |A_{s0}|^2 \} \frac{G(\Delta\omega) - 1}{G(\Delta\omega)} \cos[2\varphi_p - \varphi_i(\Delta\omega) - \varphi_s(\Delta\omega) - \Delta k z], \quad (11)$$

$$F_{-g} = \{ |A_{p0}|^2 + 2[1 - G(\Delta\omega)] |A_{s0}|^2 \} \frac{G(\Delta\omega) - 1}{G(\Delta\omega)} \sin[2\varphi_p - \varphi_i(\Delta\omega) - \varphi_s(\Delta\omega) - \Delta k z]. \quad (12)$$

(11)式和(12)式表明,信号光的增益不仅影响 FOPA 的增益系数,还会影响四波混频过程中的折射率变化,进而影响其中的快慢光产生。文献[15-16]在小信号近似的前提下,推导出了光纤参量放大器传统的放大区和增益谱边带上的延时。但是随着信号光增益的增大, $F_{\varphi}$ 和 $F_g$ 的最大值均会减小,由此使信号光增益系数和相位变化减缓,进而影响最终的增益和快慢光产生。从(11)式和(12)式中还可以看出,信号光放大和快慢光产生不仅仅由增益决定, $\varphi_p(z)$ 、 $\varphi_s(\Delta\omega, z)$ 和 $\varphi_i(\Delta\omega, z)$ 这些参量的变化同样会影响最终的信号光增益和快慢光产生。

根据文献[15]的结论,信号光的延时 $\tau$ 可以由如下方程得到:

$$\tau = d\varphi_s(\omega_s, z)/d\omega_s, \quad (13)$$

式中 $\varphi_s(\omega_s, z)$ 为第二部分中定义的 $\varphi_s(z)$ ,经过一段时间的演化,它不仅仅与距离有关,还是信号光角频率的函数。

为了得到饱和情形下信号光的延时,必须求出信号光 $A_s$ 在光纤中的完整演化过程,而描述抽运光、信号光和闲散光演化过程,则需要采用如下的非线性薛定谔方程<sup>[18]</sup>:

$$\frac{dA_p}{dz} + \frac{1}{v_{gp}} \frac{\partial A_p}{\partial t} + i \frac{\beta_{2p}}{2} \frac{\partial^2 A_p}{\partial t^2} = -\frac{\alpha}{2} A_p + i\gamma \{ [ |A_p|^2 + 2(|A_s|^2 + |A_i|^2) ] A_p + 2A_s A_i A_p^* \exp(i\Delta kz) \}, \quad (14)$$

$$\frac{dA_s}{dz} + \frac{1}{v_{gs}} \frac{\partial A_s}{\partial t} + i \frac{\beta_{2s}}{2} \frac{\partial^2 A_s}{\partial t^2} = -\frac{\alpha}{2} A_s + i\gamma \{ [ |A_s|^2 + 2(|A_p|^2 + |A_i|^2) ] A_s \} + i\gamma A_p^2 A_i^* \exp(-i\Delta kz), \quad (15)$$

$$\frac{dA_i}{dz} + \frac{1}{v_{gi}} \frac{\partial A_i}{\partial t} + i \frac{\beta_{2i}}{2} \frac{\partial^2 A_i}{\partial t^2} = -\frac{\alpha}{2} A_i + i\gamma \{ [ |A_i|^2 + 2(|A_p|^2 + |A_s|^2) ] A_i + A_p^2 A_s^* \exp(-i\Delta kz) \}. \quad (16)$$

通过数值求解方程(14)~(16)式,可以得到信号光的功率 $|A_s|^2$ 和最终的累积相位变化 $\varphi_s(\omega_s, z)$ ,根据(7)式和(13)式,可以得到信号光的增益 $G$ 和非线性效应引入的延时 $\tau$ ,即量化的快慢光。该方法得到的延时量不受光纤参量放大器中小信号条件的限制,最终可以准确得到饱和条件下的延时量。

纤损耗为 $0.3 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$  ( $\alpha = 0.0691 \text{ km}^{-1}$ )。  $\gamma = 2.5 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ ,  $P_0 = 2 \text{ W}$ , 选择光纤长度为 $L = 1 \text{ km}$ , 因此 $\gamma P_0 L = 5 \text{ rad}$ , 该数值对应于 FOPA 中最大增益点 $37.4 \text{ dB}$ 。通过比较解析结论与数值仿真结论,最终得到如图 1 所示的延时谱线。为对比饱和效应对 FOPA 中增益的影响,同时画出三种初始信号光功率条件下的增益变化关系,如图 2 所示。在输入信号光功率较低时,延时和增益分别如图 1(a)和图 2(a),此时初始信号光功率仅仅为 $0.1 \text{ mW}$ 。延时的解析结论与数值结论吻合得很好,但是增益的解析解和数值解却在增益的峰值上表现出明显差异,这种差异达到了 $2 \text{ dB}$ 。将初始信号光功率增加到 $1 \text{ mW}$ ,延时与增益如图 1(b)和图 2(b)所示,延时在大多数频段上仍然能够和解析解吻合,仅仅在最大延时(最大的慢光)和最小延时(最大的快光)的位置有较小的差别,而增益的解析解却与数值解有较大的差别,在图 2(b)中这种差别达到了 $10 \text{ dB}$ 。这些结论说明饱和效应对延时的影响没有其对增益的影响明显。但是,当继续增大初始输入信号光功率达到 $10 \text{ mW}$ 时,饱和效应对延时的影响开始显现。在图 1(c)中,在 $\pm 0.3 \text{ THz}$ 频率附近,数值计算得到的延时结果仅仅为解析结论的

## 4 延时的解析解与数值解的对比结论与分析

### 4.1 饱和效应对延时和增益的影响对比

研究饱和效应对快慢光影响的直观方法是:取不同的初始信号光功率,通过对比信号光归一化延时的解析解和数值解,从其中的差异可以估计出饱和效应对快慢光的影响。为了类比饱和效应对增益的影响,文中同时给出取不同初始信号光功率时信号光的增益变化。

仿真中用到的参数如下:零色散波长选择在 $1550 \text{ nm}$ 附近,假设此时 $\beta_1 = -0.00056 \text{ ps}^4 \cdot \text{km}^{-1}$ ,它在整个光纤中可以近似认为是常数。将抽运光的波长选择在 $1530 \text{ nm}$ 附近,保证 $\beta_{2p} = -6 \text{ ps}^2 \cdot \text{km}^{-1}$ 。二阶色散和四阶色散系数全为负,则光纤参量放大器为宽带情形, $1530 \text{ nm}$ 附近的光

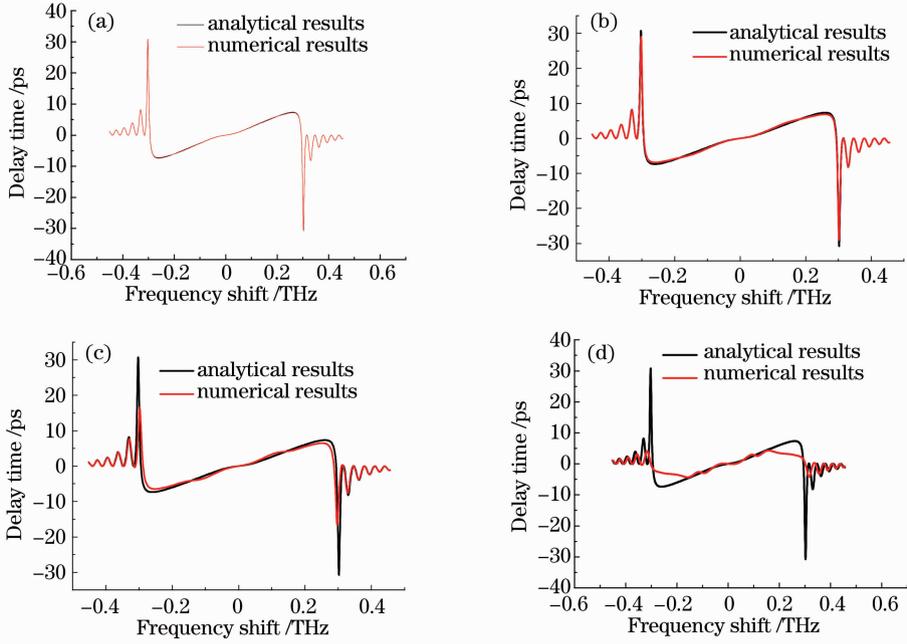


图 1 饱和效应对 FOPA 中信号光延时的影响。(a)  $P_s/P_p=1/20000$ (初始信号光功率为 0.1 mW); (b)  $P_s/P_p=1/2000$ (初始信号光功率为 1 mW); (c)  $P_s/P_p=1/200$ (初始信号光功率为 10 mW); (d)  $P_s/P_p=1/20$ (初始信号光功率为 100 mW)  
 Fig.1 Influence of saturation effect on the delay time in FOPA. (a)  $P_s/P_p=1/20000$  (initial signal power is 0.1 mW); (b)  $P_s/P_p=1/2000$  (initial signal power is 1 mW); (c)  $P_s/P_p=1/200$  (initial signal power is 10 mW); (d)  $P_s/P_p=1/20$  (initial signal power is 100 mW)

一半左右且最大延时的波长向着抽运光波长一侧漂移,该频率区域主要位于文献[16]讨论的增益谱边

带的快慢光增强区域内,在该频率上,增益的差别只有几个 dB。在 $[-0.2 \text{ THz}, 0.2 \text{ THz}]$ 频率范围内,

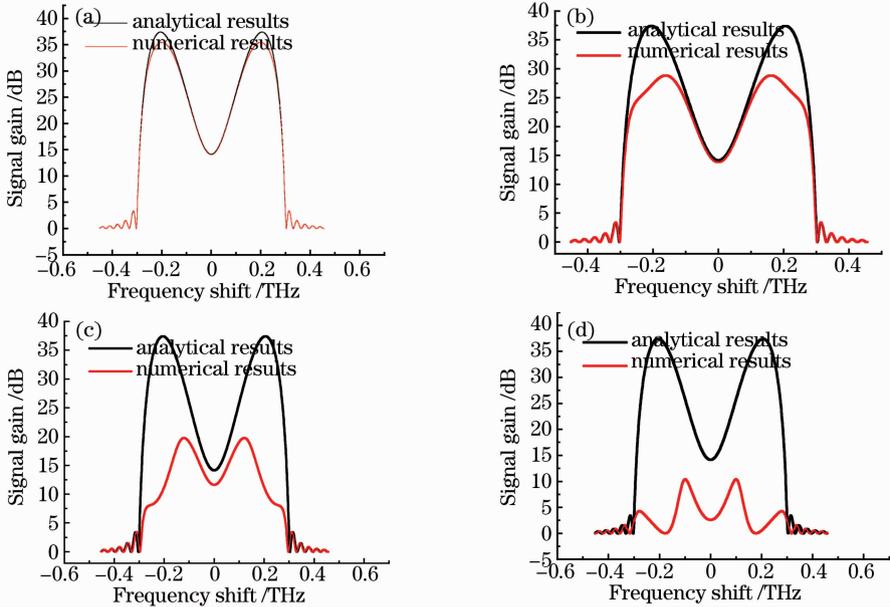


图 2 饱和效应对 FOPA 中信号光增益的影响。(a)  $P_s/P_p=1/20000$  (初始信号光功率为 0.1 mW); (b)  $P_s/P_p=1/2000$  (初始信号光功率为 1 mW); (c)  $P_s/P_p=1/200$  (初始信号光功率为 10 mW); (d)  $P_s/P_p=1/20$  (初始信号光功率为 100 mW)

Fig.2 Influence of saturation effect on the signal gain in FOPA. (a)  $P_s/P_p=1/20000$  (initial signal power is 0.1 mW); (b)  $P_s/P_p=1/2000$  (initial signal power is 1 mW); (c)  $P_s/P_p=1/200$  (initial signal power is 10 mW); (d)  $P_s/P_p=1/20$  (initial signal power is 100 mW)

延时的解析和数值结论的差别却很小,但是图 2(c)中显示的增益曲线在该区间的差别达到了近 20 dB。延时和增益受到饱和效应影响的区域不同,但是都是在各自数值较大的区域受到饱和效应的影响较大。若将初始信号光功率设置得很高,与抽运光功率的比例为 1:20,则经过很短距离的相互作用,信号光就达到了饱和,此时延时和增益结论如图 1(d)和图 2(d)所示。延时只在  $[-0.1 \text{ THz}, 0.1 \text{ THz}]$  频率范围内,差别较小,在其余的频率范围内,延时的数值结论与解析结论有很大的差异,小信号模型分析快慢光可信度降低。而此时,增益谱与解析结论几乎均不一致。小信号模型完全失效。

综上所述,延时受到饱和效应影响较大的频率区域位于光纤参量放大器增益谱的边带上,而在此区域上增益受到饱和效应的影响并不大;在完全相位匹配频率附近,增益受到饱和效应的影响较大,而此频率区域内,延时受到饱和效应的影响不大。

以上结论的共同点是,饱和效应对延时和增益本身较大的区域影响很大,由于延时和增益最大的频率范围本身不同,因此饱和效应对延时影响较大的频率范围与对增益影响较大的频率范围并不相

同。因此,光纤参量放大器延时量小信号模型的使用在增益谱的边带上受到了一定的限制。

#### 4.2 在完整模型下光纤长度和抽运光功率对延时的影响分析

文献[15]在小信号模型下得出了长光纤更有利于产生 FOPA 中快慢光的结论,但是按照 4.1 节的分析可知,饱和效应在某些区域对延时产生较大的影响,因此该节在完整模型下重新分析光纤长度和抽运光功率的选取对延时的影响。

图 3 为  $\gamma P_p L = 4$  时两种不同的情形,假设  $\gamma = 2 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ ,色散和光纤的损耗参数,以及抽运光和信号光波长的选择均与 4.1 节相同。情形一,  $P_0 = 2 \text{ W}, L = 1 \text{ km}$ ;情形二,  $P_0 = 1 \text{ W}, L = 2 \text{ km}$ 。考虑两种初始信号光功率,可得图 3(a)和(b)两种情况。在  $P_s/P_p = 1/2000$  时,得到的结论与文献[16]中的一致,较长的光纤且较低的抽运光功率更有利于 FOPA 中产生快慢光。而当  $P_s/P_p = 1/200$  时,由于较低的抽运光功率容易产生信号光的饱和现象,因此情形一中未必产生较大的快慢光现象,该结论从图 3(b)中可以验证。

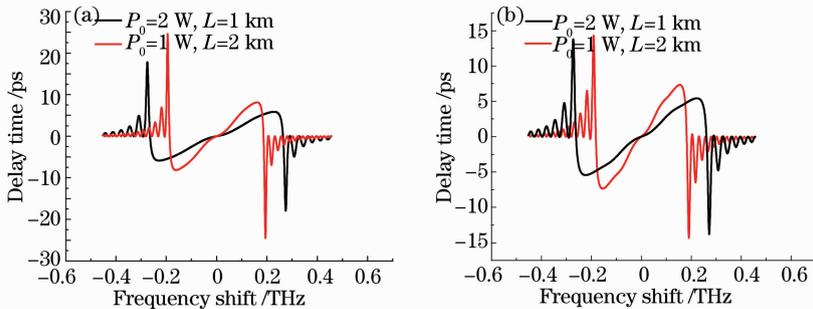


图 3 抽运光功率和光纤长度的选择对延时的影响。(a)  $P_s/P_p = 1/2000$  (初始信号光功率为 1 mW); (b)  $P_s/P_p = 1/200$  (初始信号光功率为 10 mW)

Fig. 3 Influence of pump power and fiber length on the delay time. (a)  $P_s/P_p = 1/2000$  (initial signal power is 1 mW); (b)  $P_s/P_p = 1/200$  (initial signal power is 10 mW)

## 5 结 论

在光纤参量放大器中,由于四波混频的作用,强抽运光将引起信号光的非线性折射率随频率变化,从而产生快慢光现象。本文研究了抽运光饱和效应对信号光延迟的影响。研究结论表明光纤参量放大器的边带上饱和效应的影响更严重。同时分析了饱和情况下,光纤长度和抽运光功率选择对快慢光的影响。该结论有助于更加深刻地理解 FOPA 中快慢光在真实条件下的变化规律。

## 参 考 文 献

- 1 C K N Patel, R E Slusher. Self-induced transparency in gases [J]. Phys Rev Lett, 1967, 19(18): 1019-1022.
- 2 S E Harris, J E Field, A Imamoglu. Nonlinear optical processes using electromagnetically induced transparency [J]. Phys Rev Lett, 1990, 64(10): 1107-1110.
- 3 L V Hau, S E Harris, Z Dutton, *et al.*. Light speed reduction to 17 metres per second in an ultracold atomic gas [J]. Nature, 1999, 397(6720): 594-598.
- 4 P Palinginis, S Crankshaw, F Sedgwick, *et al.*. Ultraslow light ( $\ll 200 \text{ m/s}$ ) propagation in a semiconductor nanostructure [J]. Appl Phys Lett, 2005, 87(17): 171102.
- 5 A Schweinsberg, N N Lepeshkin, M S Bigelow, *et al.*. Observation of superluminal and slow light propagation in erbium-doped optical fiber [J]. Europhysics Letters, 2006, 73(1): 218-

- 224.
- 6 Y Okawachi, M S Bigelow, J E Sharping, *et al.*. Tunable all-optical delays via Brillouin slow light in an optical fiber[J]. *Phys Rev Lett*, 2005, 94(15): 153902.
- 7 Jay E Sharping, Y Okawachi, A L Gaeta. Wide bandwidth slow light using a Raman fiber amplifier[J]. *Opt Express*, 2005, 13(16): 6092–6098.
- 8 David Dahan, Gadi Eisenstein. Tunable all optical delay via slow and fast light propagation in a Raman assisted fiber optical parametric amplifier: a route to all optical buffering[J]. *Opt Express*, 2005, 13(16): 6234–6249.
- 9 Lilin Yi, W Hu, Y Su, *et al.*. Design and system demonstration of a tunable slow-light delay line based on fiber parametric process [J]. *Photon Technol Lett*, 2006, 18(24): 2575–2577.
- 10 Zhang Yundong, Weng Wen, Yu Bo, *et al.*. Technology of slow light in photonic crystal waveguides[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, 44(10): 26–32.  
掌蕴东, 翁文, 喻波, 等. 光子晶体波导慢光技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2007, 44(10): 26–32.
- 11 A Yariv, Y Xu, R Lee, *et al.*. Coupled-resonator optical waveguide: a proposal and analysis[J]. *Opt Lett*, 1999, 24(11): 711–713.
- 12 K Y Song, K Hotate. 25 GHz bandwidth Brillouin slow light in optical fibers[J]. *Opt Lett*, 2007, 32(3): 217–219.
- 13 J Li, L O'Faolain, T F Krauss. Four-wave mixing in slow light photonic crystal waveguides with very high group index[J]. *Opt Express*, 2012, 20(16): 17474–17479.
- 14 A Willinger, E Shumakher, G Eisenstein. On the roles of polarization and Raman-assisted phase matching in narrowband fiber parametric amplifiers[J]. *J Lightwave Technol*, 2008, 26(14): 2260–2268.
- 15 Lin Gui, Kun Xu, Dapeng Wang, *et al.*. Character analysis of slow light with communication waveband in fiber optical parametric amplifier[J] *Opt Commun*, 2010, 283(21): 4350–4357.
- 16 Lin Gui, Kun Xu, Dapeng Wang, *et al.*. Tunable slow and fast light with large bandwidth in the band-edge of gain spectrum of the wide band fiber optical parametric amplifier [J]. *Opt Commun*, 2011, 284(12): 3095–3100.
- 17 E Shumakher, N Orbach, A Nevet, *et al.*. On the balance between delay, bandwidth and signal distortion in slow light systems based on stimulated Brillouin scattering in optical fibers [J]. *Opt Express*, 2006, 14(13): 5877–5884.
- 18 G P Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics (4th Edition)*[M]. New York: Academic Press, 2007.

栏目编辑: 王晓琰