

# 具有饱和和非线性的非克尔光纤中 自相位调制效应所致啁啾\*

苗洪利<sup>1</sup> 王 晶<sup>1</sup> 冯启元<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>内蒙古师范大学物理系; <sup>2</sup>内蒙古大学物理系 呼和浩特 010022)

**摘要** 在考虑光纤损耗下,从理论上推导出具有饱和和非线性的非克尔光纤中自相位调制效应产生啁啾的解析表达式;并在计算机上模拟了光纤中啁啾的演变过程。结果表明,非克尔光纤中的饱和效应越强,自相位效应所产生的啁啾越小;随着光纤传输,啁啾不断增大;而且啁啾与光纤损耗、入射脉冲的峰值功率等因素有关。

**关键词** 饱和和非线性,自相位调制效应,啁啾

## 1 引 言

自相位调制(SPM)指的是光场在光纤内传输时光场本身引起的相移。由于 SPM 引起的相移与时间有关,所以光脉冲的中心频率与两侧有不同的瞬时光频率,其差值就叫频率啁啾。这种啁啾随传输距离的增大而增大,即当脉冲沿光纤传输时,新的频率分量在不断产生。因而 SPM 效应的主要作用是展宽了光纤内传输的光脉冲的频谱<sup>[1]</sup>。

在石英光纤中 SPM 效应产生的啁啾已经作了讨论<sup>[1]</sup>。近来,人们对高折射率、反应时间短的具有饱和和非线性的非克尔光纤进行了研究<sup>[2~4]</sup>,多数对非克尔光纤的讨论都忽略了光纤损耗<sup>[5,6]</sup>,研究结果却引起了人们的极大关注。但是,尚未见到对具有饱和和非线性的非克尔光纤中 SPM 效应产生啁啾的讨论。本文研究了具有饱和和非线性的非克尔光纤中 SPM 效应所产生的啁啾。通过对石英光纤和非克尔光纤中 SPM 效应所产生的啁啾进行比较,发现非克尔光纤中 SPM 效应产生的啁啾变小,啁啾的两个极值点向脉冲边缘移动。而且,啁啾与光纤的损耗、入射脉冲的峰值功率和形状有关。此结果对于深入研究非克尔介质的特性及其开发应用具有重要意义。

## 2 理论分析

脉冲在具有饱和和非线性的非克尔光纤里的传输方程为<sup>[3]</sup>

$$i \frac{\partial A}{\partial Z} = \frac{1}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} - \frac{i}{2} \alpha A - \frac{\gamma |A|^2 A}{1 + \Gamma |A|^2} \quad (1)$$

\* 内蒙古自然科学基金资助项目。

收稿日期: 1998-03-20; 收到修改稿日期: 1998-07-13

引入归一化振幅  $A(Z, T) = \sqrt{P_0} \exp\left(-\frac{\alpha}{2}Z\right) U(Z, T)$ , 则(1)式变为

$$i \frac{\partial U}{\partial Z} = \frac{1}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 U}{\partial T^2} - \frac{\gamma P_0 \exp(-\alpha Z) |U|^2 U}{1 + \Gamma P_0 \exp(-\alpha Z) |U|^2} \quad (2)$$

式中  $U$  为归一化慢变包络振幅,  $T = t - \beta_1 Z$  为延迟时间,  $\beta_2$  为二阶色散,  $\gamma$  为非线性系数,  $\alpha$  为损耗系数,  $P_0$  为入射脉冲峰值功率,  $\Gamma$  为饱和参数, 其范围为  $0 < \Gamma < 1$ , 当  $\Gamma = 0$  时, 方程(2)描述的是光在克尔介质里的传输方程。

方程(2)中等式右边第一项代表色散效应, 第二项代表非线性效应。若满足一定条件, 色散效应的作用很弱, 可以忽略, 这时只有非线性作用。方程(2)简化为

$$i \frac{\partial U}{\partial Z} = - \frac{\gamma P_0 \exp(-\alpha Z) |U|^2 U}{1 + \Gamma P_0 \exp(-\alpha Z) |U|^2} \quad (3)$$

积分上式得

$$U(Z, T) = U(0, T) \exp\left[-\frac{i\gamma}{\alpha\Gamma} \ln \frac{1 + \Gamma P_0 \exp(-\alpha Z) |U|^2}{1 + \Gamma P_0 |U|^2}\right] \quad (4)$$

所以相移为

$$\Phi(Z, T) = -\frac{\gamma}{\alpha\Gamma} \ln \frac{1 + \Gamma P_0 \exp(-\alpha Z) |U|^2}{1 + \Gamma P_0 |U|^2} \quad (5)$$

SPM 效应产生的啁啾为

$$\delta\omega(T) = -\frac{\partial\Phi}{\partial T} = -\frac{\gamma P_0 [1 - \exp(-\alpha Z)] \frac{\partial|U|^2}{\partial T}}{\alpha(1 + \Gamma P_0 |U|^2) [1 + \Gamma P_0 \exp(-\alpha Z) |U|^2]} \quad (6)$$

(6)式就是具有饱和和非线性的非克尔光纤中 SPM 效应所产生的啁啾解析表达式。当  $\Gamma = 0$  时, (6)式复原为克尔光纤中 SPM 效应所产生的啁啾表达式, 与文献[1]中的结果相同。

从(6)式可见, 非克尔光纤中的啁啾比克尔光纤中的啁啾小, 减小的程度与非克尔光纤的饱和系数、光纤损耗系数、峰值功率、入射脉冲形状等因素有关。非克尔光纤的饱和效应越强, 啁啾减小得越多。

如果入射脉冲为高斯脉冲

$$U(0, T) = \exp\left(-\frac{T^2}{2T_0^2}\right) \quad (7)$$

式中  $T_0$  为入射脉冲的初始宽度, 把(7)式代入(6)式得

$$\delta\omega(T) = \frac{\frac{2}{T_0\alpha} \gamma P_0 [1 - \exp(-\alpha Z)] \frac{T}{T_0} \exp\left(-\frac{T^2}{T_0^2}\right)}{\left[1 + \Gamma P_0 \exp\left(-\frac{T^2}{T_0^2}\right)\right] \left[1 + \Gamma P_0 \exp(-\alpha Z) \exp\left(-\frac{T^2}{T_0^2}\right)\right]} \quad (8)$$

如果入射脉冲为孤子

$$U(0, T) = \operatorname{sech}\left(\frac{T}{T_0}\right) \quad (9)$$

把(9)式代入(6)式得

$$\delta\omega(T) = \frac{\frac{8\gamma P_0}{T_0\alpha} [1 - \exp(-\alpha Z)] \left[\exp\left(-\frac{2T}{T_0}\right) - \exp\left(\frac{2T}{T_0}\right)\right]}{\left[\exp\left(\frac{2T}{T_0}\right) + \exp\left(-\frac{2T}{T_0}\right) + 2\right] \left[\exp\left(\frac{2T}{T_0}\right) + \exp\left(-\frac{2T}{T_0}\right) + 2 + 4\Gamma P_0\right]}$$

$$\frac{1}{\exp\left(\frac{2T}{T_0}\right) + \exp\left(-\frac{2T}{T_0}\right) + 2 + 4\Gamma P_0 \exp(-aZ)} \tag{10}$$

### 3 讨 论

从(8),(10)式看到,不同的入射脉冲所产生的啁啾是不一样的。为了清楚地看到 SPM 效应所产生的啁啾与初始入射脉冲形状的关系,我们给出了图 1。其中 (a) 图的入射脉冲是高斯脉冲,而 (b) 图的入射脉冲是孤子形脉冲。比较两图发现:(a) 图的啁啾远大于 (b) 图的啁啾;(a) 图的啁啾非线性区域也比 (b) 图中的大;更本质的区别是 (a) 图的啁啾在脉冲中心附近为正线性啁啾, (b) 图的啁啾在脉冲中心附近却为负线性啁啾。

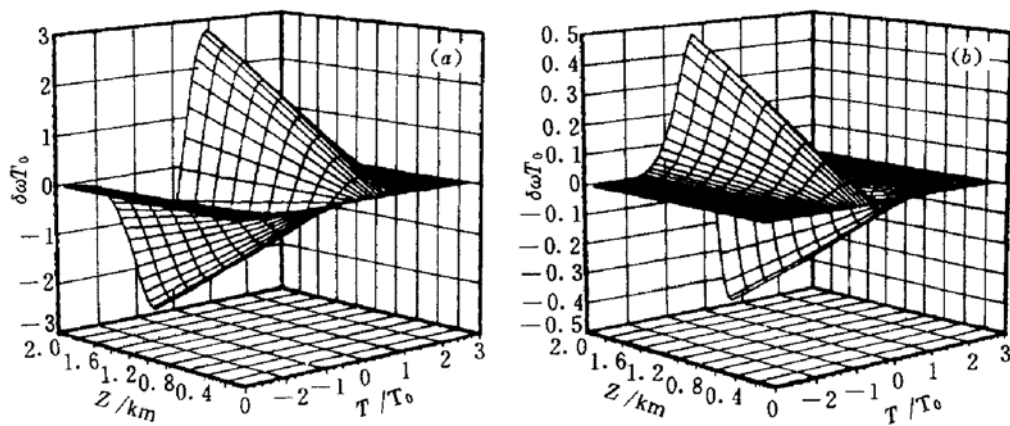


图 1 克尔光纤中 SPM 效应所致啁啾的演变,取  $\alpha = 0.1/\text{km}$ ,  $P_0 = 2 \text{ W}$ ,  $\gamma = 1 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$ ,  $\Gamma = 0$

(a) 入射脉冲是高斯脉冲;(b) 入射脉冲是孤子脉冲

Fig. 1 Evolution of chirp induced by SPM with parameters of  $\alpha = 0.1/\text{km}$ ,  $P_0 = 2 \text{ W}$ ,  $\gamma = 1 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$ , and  $\Gamma = 0$

(a) the input pulse is Gaussian; (b) input pulse is the soliton pulse

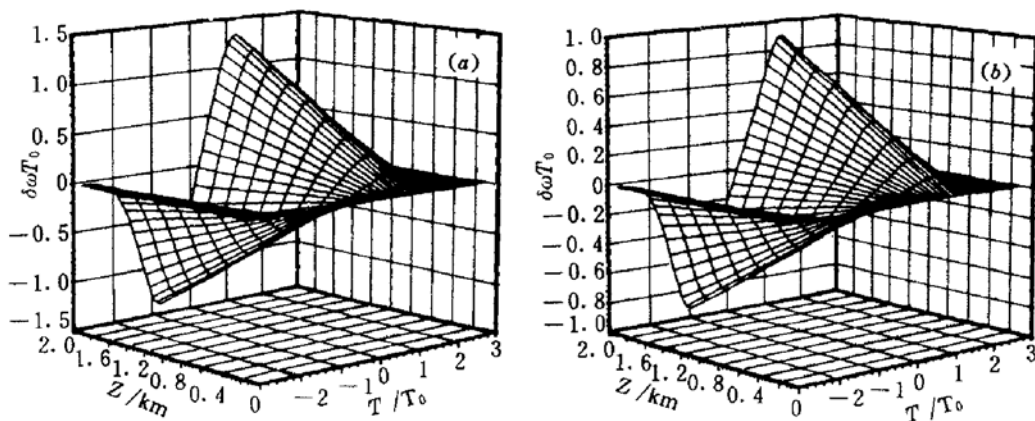


图 2 非克尔光纤中 SPM 效应所致啁啾的演变

(a) 除  $\Gamma = 0.5$  外,其他参数同图 1;(b) 除  $\Gamma = 1$  外,其他参数同图 1

Fig. 2 Evolution of chirp induced by SPM in non-Kerr-like optical fibers

(a) with parameters identical with Fig. 1 except  $\Gamma = 0.5$ ; (b) with parameters identical with Fig. 1 except  $\Gamma = 1$

如果入射脉冲为高斯脉冲,当  $\Gamma = 0$  时,(8) 式简化为

$$\delta\omega(T) = \frac{2}{T_0\alpha}\gamma P_0[1 - \exp(-\alpha Z)] \frac{T}{T_0} \exp\left(-\frac{T^2}{T_0^2}\right) \quad (11)$$

(11)式是克尔光纤中 SPM 效应产生的啁啾。为了对比分析(11)式与(8)式,看清非克尔光纤同克尔光纤的差别,我们在计算机上模拟了克尔光纤和非克尔光纤中啁啾演变过程,如图 1(a),图 2 所示。从图 2 可看到,具有饱和和非线性的非克尔光纤中 SPM 产生的啁啾有这样的特点:啁啾是非线性的,在前沿附近是负的(红移),而到后沿附近则变为正的(蓝移),在脉冲中心点等于零,而在脉冲中心附近区域啁啾却是线性的。把图 2 与图 1(a)对比可知,非克尔光纤中的啁啾比克尔光纤中的啁啾小很多,饱和系数越大即饱和效应越强,啁啾越小,并且啁啾的极值点向脉冲边缘移动得越多。

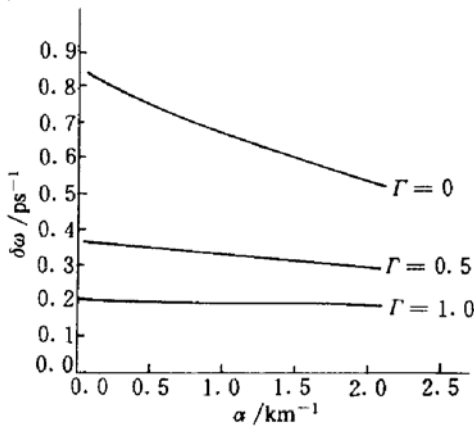


图 3 啁啾随光纤损耗的变化曲线,取  $T_0 = 1$  ps,  $T = 0.8$  ps,  $Z = 0.5$  km,其他参数同图 1

Fig. 3 Chirp versus fiber loss with  $T_0 = 1$  ps,  $T = 0.8$  ps, and  $Z = 0.5$  km and the other parameters are the same as in Fig. 1

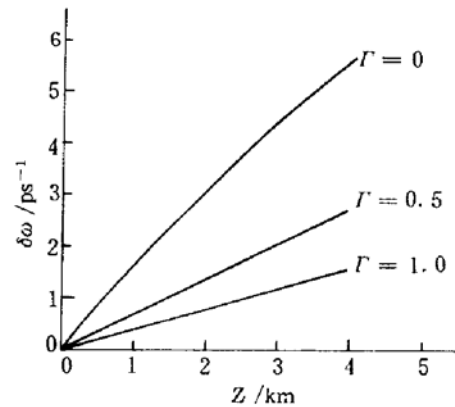


图 4 啁啾随峰值功率变化曲线,取  $T_0 = 1$  ps,  $T = 0.8$  ps,  $\alpha = 0.1/\text{km}$ ,  $\gamma = 1 \text{ W}^{-1}\text{cm}^{-1}$ ,  $Z = 0.5$  km

Fig. 4 Chirp versus peak power with  $T_0 = 1$  ps,  $T = 0.8$  ps,  $\alpha = 0.1/\text{km}$ ,  $\gamma = 1 \text{ W}^{-1}\text{cm}^{-1}$ , and  $Z = 0.5$  km

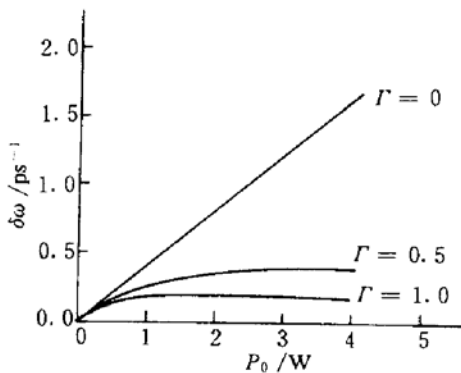


图 5 啁啾随光纤长度变化曲线,相应参数同图 4  
Fig. 5 Chirp versus fiber length with the parameters identical with Fig. 4

啁啾趋于常数。由此可见,饱和效应越强,啁啾趋于常数越快。

啁啾随光纤长度变化如图 5 所示。无论在克尔光纤中还是在非克尔光纤中,啁啾沿光纤传输不断增大,基本上呈直线上上升趋势,饱和效应越强,上升幅度越小。

由(8)式可知啁啾与光纤损耗、峰值功率等因素有关。图 3 给出啁啾随光纤损耗的变化曲线,分别取  $\Gamma = 0, 0.5, 1$ 。由图 3 看到,在克尔介质中啁啾随损耗增大而急剧下降。在非克尔介质中,当  $\Gamma = 0.5$  时,啁啾随损耗增大呈直线下降,但非常缓慢;当  $\Gamma = 1$  时,啁啾随损耗增大而不变,基本上为一常数。图 4 是啁啾随峰值功率的变化曲线。在克尔光纤中啁啾与峰值功率成正比。在非克尔光纤中,当  $\Gamma = 0.5$  时,在  $0 < P_0 < 3$  的范围内,啁啾随峰值功率增大则缓慢增大,  $P_0 > 3$  时,啁啾趋于常数;当  $\Gamma = 1$  时,在  $0 < P_0 < 1.8$  范围内,啁啾随峰值功率增大而增大,  $P_0 > 1.8$ , 啁啾

## 4 结 论

综上所述,SPM 效应在不同光纤中所起的作用强弱不同,在克尔光纤中,SPM 效应较强,所产生的啁啾大,从而导致频谱有较大展宽。对具有饱和和非线性的非克尔光纤,SPM 效应较弱,饱和和非线性越强,SPM 效应越弱,所产生的啁啾也越小,这样频谱就有很小的展宽。SPM 效应所致啁啾还受光纤损耗、峰值功率、入射脉冲形状影响。因此在实践中,若想改变光纤中 SPM 效应产生的啁啾,就可以选择适当的饱和和非线性系数、光纤损耗、峰值功率、入射脉冲形状,以求光纤中群速度色散效应与 SPM 效应达到平衡,从而实现孤子无畸变传输。

## 参 考 文 献

- 1 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics*. Boston: Academic Press Inc. , 1998. 84~112
- 2 Wieslaw Krolikowski, Barry Luther-Davies. Dark optical soliton in saturable nonlinear media. *Opt. Lett.* , 1993, 18(3):188~190
- 3 A. Kumar. Invariant of motion method for nonlinear pulse propagation in optical fibers. *Phys. Rev. A*, 1991, 44(3):2130~2134
- 4 M. Karlsson. Optical beams in saturable self-focusing media. *Phys. Rev. A*, 1992, 46(5):2726~2734
- 5 J. Migucl Hickmann. Modulational instability in semiconductor-doped glass fibers with saturable nonlinearity. *Opt. Lett.* , 1993, 18(3):182~184
- 6 M. L. Lyra, A. S. Gouveia-Neto. Saturation effects on modulational instability in non-Kerr-like monomode optical fibers. *Opt. Commun.* , 1994, 108(1~3):117~120

## Chirp Induced by Self-phase Modulation in Non-Kerr-like Optical Fibers with Saturable Nonlinearity

Miao Hongli<sup>1</sup> Wang Jing<sup>1</sup> Feng Qiyuan<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Physics, Inner Mongolia Normal University  
<sup>2</sup>Department of Physics, Inner Mongolia University, Hohhot 010022

**Abstract** An analytic expression of the self-phase modulation induced by chirp in non-Kerr-like optical fibers with saturable nonlinearity is derived taking into account the fiber loss. The evolution of chirp is simulated by computer. The results show that the more powerful the saturable effects, the smaller the chirp induced by self-phase modulation; the chirp increases in magnitude with the propagation distance and the chirp depends on the fiber loss and the peak power of the incident pulse.

**Key words** saturable nonlinearity, self-phase modulation effect, chirp