

文章编号: 1001-3806(2003)04-0342-03

超高斯光脉冲在单模光纤中的传输特性*

吴建伟 夏光琼 吴正茂

(西南师范大学物理系,重庆,400715)

摘要: 从光脉冲在光纤中传输演变所满足的基本方程出发,研究了超高斯光脉冲在普通单模光纤中的传输特性。数值模拟的结果表明,超高斯光脉冲入射后脉冲波形、瞬时啁啾以及峰值强度的演变规律与高斯脉冲入射时不同,脉冲波形不再总保持单峰结构,通常将经历一个从近平顶、多峰、最后到单峰的演变过程;从脉冲的前沿到后沿,瞬时啁啾也不再为线性,而是具有多个极值;峰值强度随传输距离的变化趋势也不再为单调递减,而是先增加后减小。这些变化规律还与入射超高斯脉冲的边沿陡峭程度和初始频率啁啾有关。

关键词: 超高斯光脉冲;单模光纤;色散;啁啾

中图分类号: TN929.11 文献标识码: A

Transmission characteristics of super-Gaussian optical pulse in the single-mode optical fiber

Wu Jianwei, Xia Guangqiong, Wu Zhengmao

(Department of Physics, Southwest Normal University, Chongqing, 400715)

Abstract: Based on the propagation equation used to describe the normalized amplitude evolution in the fiber, the evolution of super-Gaussian optical pulse propagating in the single-mode fiber has been investigated numerically. The results show that for an incident super-Gaussian pulse with steep edges, the evolution of its shape, frequency chirp, and peak intensity are different from those for an incident Gaussian pulse. Its shape undergoes a variation from near-rectangular, multi-peak, and finally to single-peak; its frequency chirp is not linear; and its peak intensity increases at first, then passing a maximum, and finally decreases monotonously. And these evolutions relate to the shape and frequency chirp of the incident super-Gaussian optical pulse.

Key words: super-Gaussian optical pulse; single-mode fiber; dispersion; chirp

引 言

人们对光脉冲在光纤中传输演变的理论研究过程中,常常假定入射光脉冲具有高斯型分布^[1,2]。但在实际的光通信系统中,人们常采用由直接调制半导体激光器产生的光脉冲作为信号脉冲,而实验结果表明这种脉冲具有比高斯脉冲更为陡峭的前沿和后沿^[3],其脉冲形状更接近于超高斯分布,并且通常还带有一定量的啁啾。因而在研究这种脉冲在光纤中的传输特性时,用超高斯分布来模拟更接近物理事实。Agrawal 等人^[4]曾对脉冲边沿变化较缓的超高斯脉冲在光纤中的传输特性进行了一些初步

研究,但是没有深入下去。而对具有更加陡峭边沿的超高斯入射脉冲在光纤中的传输特性的研究却未见报道。由于直接调制半导体激光器所产生的光脉冲具有陡峭的边沿,因此对它的研究就显得很有必要。基于此,作者对具有不同陡峭程度的超高斯脉冲在单模光纤中传输时,脉冲的波形、瞬时啁啾、以及峰值强度的演变进行了深入细致的研究。

1 理论分析

忽略光纤的非线性效应时,脉冲在单模光纤中的传输演变方程可简化为^[4]:

$$i \frac{\partial U}{\partial Z} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 U}{\partial T^2} + \frac{i}{6} \frac{\partial^3 U}{\partial T^3} \quad (1)$$

式中, Z 为脉冲在光纤中传输的距离, $T (= t - Z/v_g, v_g$ 为群速度) 为在以群速度移动的坐标系所测得的时间, $U(Z, T)$ 为归一化的脉冲包络函数, β_2 为群速度色散系数, β_3 为高阶色散系数。利用傅

* 重庆市应用基础研究项目和教育部项目。

作者简介: 吴建伟,男,1977年1月出生。硕士研究生。主要从事半导体激光与光纤通信方面的研究。

收稿日期: 2002-07-23; 收到修改稿日期: 2002-09-23

氏变换,不难求得(1)式的解为:

$$U(Z, T) = |U(Z, T)| \exp[i \phi(Z, T)] = \frac{1}{2} U(0, T) \exp\left[\frac{i}{2} \beta_2 T^2 Z + \frac{i}{6} \beta_3 T^3 Z - i T\right] d \quad (2)$$

式中, $\phi(Z, T)$ 为相位, $U(0, T)$ 为入射场的傅里叶变换,即:

$$U(0, T) = \int U(0, z) \exp(i T z) dz \quad (3)$$

如果入射脉冲为具有线性啁啾的超高斯脉冲,则有:

$$U(0, T) = \exp\left[-\frac{1+C_i}{2} \left(\frac{T}{T_0}\right)^{2m}\right] \quad (4)$$

式中, C_i 为入射脉冲的啁啾因子, T_0 代表在 $1/e$ 强度点的半宽, m 为脉冲形状参数。 $m = 1$ 代表高斯脉冲,随着 m 的增大,脉冲的中心平顶部分将变宽,而脉冲边沿将变得陡峭。当入射脉冲为高斯脉冲(即 $m = 1$),此时(2)式可给出解析解^[4];当入射脉冲的 $m > 1$ 时,(2)式虽然没有解析解,但可以通过计算机对它进行数值求解。作者利用 Matlab 应用软件,数值模拟了具有不同分布的超高斯光脉冲入射(即 m 取不同值)时,脉冲波形、瞬时频率啁啾、峰值强度随传输距离的演变。

2 结果与讨论

2.1 脉冲波形和瞬时频率啁啾的演变

图 1 给出了 m 取不同值的无啁啾超高斯光脉冲入射时,脉冲的瞬时频率啁啾和波形的演变情况,其中图 1a,图 1b,图 1c,图 1d 分别对应于 $m = 2, m = 3, m = 4, m = 5$ 。计算中所用的数据为: $\beta_2 = -20\text{ps}^2/\text{km}$ (即假设入射超高斯光脉冲的中心波长为 $1.55\mu\text{m}$), $\beta_3 = 0, T_0 = 100\text{ps}$ 。从图中可以看出:光脉冲在光纤中传输的过程中,色散引起的脉冲瞬时频率啁啾已不再是高斯脉冲入射时的线性啁啾。从脉冲的前沿到后沿,频率啁啾将出现多个极值点(即出现波动),极值点的数目随着传输距离的改变而有所变化。在所有的极值点中,啁啾波动幅度最大的极值点(共有两点且分居在脉冲的前、后沿),对脉冲形状的影响最为厉害。其离脉冲中心的距离随着传输距离的增大将出现先减小(即向中心靠近),经历一极小值以后出现单调增加的趋势(即逐渐远离脉冲中心)。同时,随着 m 的增大,极值点的个数将增多;脉冲的波形除 $m = 2$ 的超高斯光脉冲在光纤中传输时总保持单峰结构以外,其它 $m > 2$ 的超高斯脉冲的波形均将经历近平顶、多峰、最后再到单

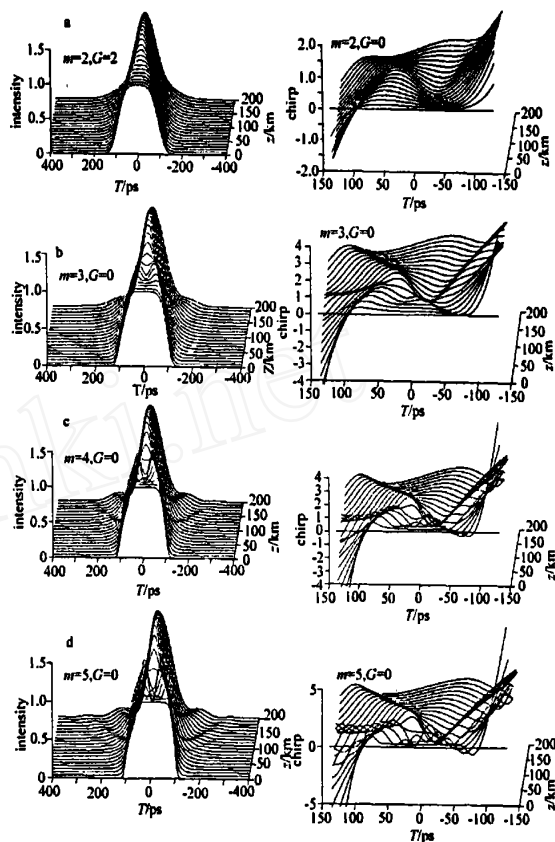


Fig. 1 Evolutions of the shape and frequency chirp of incident unchirped super-Gaussian pulses during propagating in the single-mode fibers for different m

峰的演变过程,并且随着 m 的增大,峰的数目将增多。这些现象可归结为光纤色散引起脉冲频率产生啁啾从而导致脉冲的能量分布发生变化。对于 $m = 2$ 的超高斯入射脉冲(如图 1a 所示),由于其脉冲形状接近于高斯分布,所以其脉冲形状的演变也类似于高斯脉冲,脉冲在光纤中传输总保持单峰结构。而对于 $m > 2$ 的入射脉冲,其边缘更加陡峭,中心的平顶区域较宽,色散引起的瞬时啁啾导致在这一区域内脉冲能量分布发生剧烈变化,从而使脉冲具有多峰结构。由于 m 越大,入射脉冲平顶区的宽度就越大,色散引起的瞬时啁啾的极值点数目越多(即啁啾波动得更厉害),从而使脉冲所经历的多峰数目增大。另外,从图中还可看出,当传输距离超过某个值后,脉冲将保持单峰结构,这是由于啁啾波动幅度最大的极值点已远离脉冲中心的,因而在脉冲的中心部分不再出现波动的缘故。

脉冲波形在光纤中的演变除了与 m (即脉冲的陡峭程度)有关以外,还与入射脉冲的初始啁啾有关。在图 2 中,给出了 $m = 4$ 时,具有不同初始啁啾程度的超高斯脉冲入射时,脉冲波形的演变。作图过程中所用到的数据与图 1 相同。从图中可以看出:对于一给定脉冲形状(即 m 确定)的超高斯脉冲

入射时,如果入射超高斯脉冲具有正啁啾 ($C > 0$) (如图 2a 和图 2b 所示),在脉冲传输的初始阶段,其波形变化将比无啁啾超高斯脉冲入射时的波形变化 (如图 1c 所示) 要剧烈得多。这是由于此时入射超高斯脉冲带有的正初始啁啾和光纤色散引起的频率啁啾共同作用的结果使得脉冲瞬时啁啾的波动更为剧烈;相反,对于具有负啁啾 ($C < 0$) 的入射超高斯脉冲 (如图 2c 和图 2d 所示),其初始啁啾减弱了光纤色散引起的频率啁啾,所以,其脉冲波形的变化将比无啁啾脉冲入射时要平缓一些。

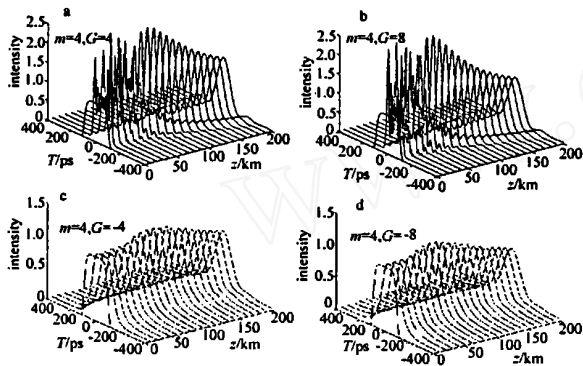


Fig. 2 Evolutions of the shape and frequency chirp of incident chirped super-Gaussian pulses during propagating in the single-mode fibers for different C

2.2 脉冲峰值强度的演变

从图 1、图 2 中还可以看出,超高斯光脉冲在普通的单模光纤传输时,脉冲峰值强度也会发生变化。图 3 给出了具有不同形状的无啁啾超高斯光脉冲入射,脉冲的峰值强度随传输距离的变化曲线。作图过程中所用到的数据与图 1 相同。从图中可以看出:其脉冲的峰值强度随传输距离变化的总体趋势为先增加,经历一极大值后再单调下降。这些结果与高斯光脉冲在光纤中随传输距离的增加峰值强度出现单调递减的趋势是不同的。这是因为光纤色散的作用是使得脉冲边沿变得平滑,由于入射的超高斯脉冲具有陡峭的边沿和较平坦的顶部,因此,为了使脉冲在传输过程中能满足能量守恒,脉冲边沿变平滑的过程中会出现脉冲峰值先有一个增加的趋势;一旦脉冲边沿足够平滑,峰值强度随传输距离的变化将如同高斯脉冲一样地变为单调递减。另外,从图中还可以看出:对于 $m > 2$ 的超高斯脉冲入射,脉冲在光纤中传输的初始阶段,脉冲的峰值强度将有一些波动,并且 m 越大,波动越频繁。其原因为:对于 $m > 2$ 的超高斯脉冲入射,由于脉冲将经历从近平顶到多峰,最后到单峰的演变过程,即脉冲峰的数目随传输距离的增大会有所改变。而在脉冲峰数目发生变化的位置,脉冲的形状必然会发生较剧烈

的变化,从而导致峰值强度产生剧烈变化。同时, m 越大,脉冲峰数目的变化就更频繁,所以,峰值强度的波动也会更频繁。

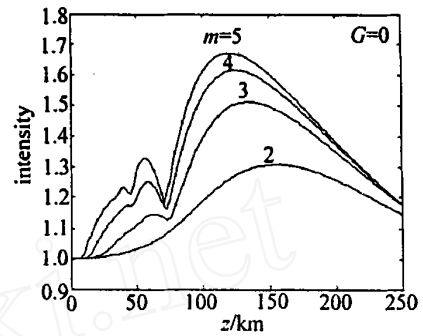


Fig. 3 Variation of peak intensity with propagation distance for incident unchirped super-Gaussian pulses with different m

既然脉冲波形的演变与入射超高斯脉冲的初始啁啾有关,那么其峰值强度的演变也必然会受到入射脉冲初始啁啾的影响。因此,在图 4 中,给出了 $m = 4$ 时,具有不同初始啁啾的超高斯脉冲在光纤中传输时,脉冲的峰值强度随传输距离的变化曲线。

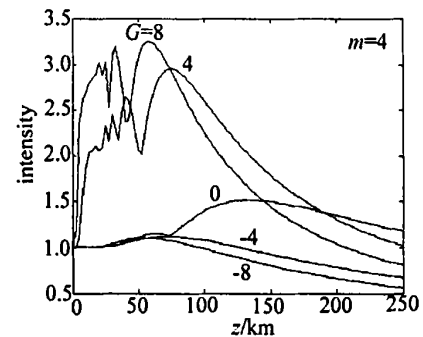


Fig. 4 Variation of peak intensity with propagation distance for incident chirped super-Gaussian pulses with $m = 4$ and different C

从图中可以看出:具有一定初始啁啾的超高斯光脉冲的峰值强度演变趋势仍为先增加后减小,并且在传输的初始阶段仍有波动。只是当入射脉冲具有正啁啾时,这一波动比无啁啾时要大得多、要剧烈得多;而当入射脉冲具有负啁啾时,这一波动比无啁啾时要小、要平缓。其原因也可归结为初始啁啾和光纤色散引起的啁啾的共同作用。当入射脉冲具有正啁啾时,在脉冲的前沿 ($T < 0$),初始啁啾为负值,而在脉冲的后沿 ($T > 0$),初始啁啾为正值;而色散引起的啁啾 (如图 1c 所示) 的极值点中,处于脉冲的前沿 ($T < 0$) 且波动幅度达到最大 (其对脉冲形状的影响最大) 的啁啾 ω 为一负值;而在脉冲的后沿且波动幅度达到最大的极值点的啁啾 ω 为一正值。它们共同作用的结果将使啁啾的波动幅度增大,从而

(下转第 348 页)

剩余泵浦光被浪费掉了,而 $R_3 = 0.98$ 时,这部分剩余泵浦光又返回谐振腔被充分利用。图 7 给出了 $L = 20\text{m}$, $R_3 = 0.98$, 泵浦功率分别为 15W, 10W, 5W, 1W 时输出功率随后腔镜对激光反射率 R_2 变化的关系曲线,可以看出:在泵浦功率大于 1W 的情况下,输出功率随反射率 R_2 的增加将单调下降。

实验中采用了图 8 的装置,以加拿大国家光学研究所(INO)生产的 EY805 双包层 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺多模光纤为增益介质进行实验,光纤长度为 5m,泵浦源是波长为 980nm 的带尾纤输出的激光器,最大输出功率为 16W,在低功率泵浦的情况下,观察到了激光输出,实验正在进行之中,结果另文报道。

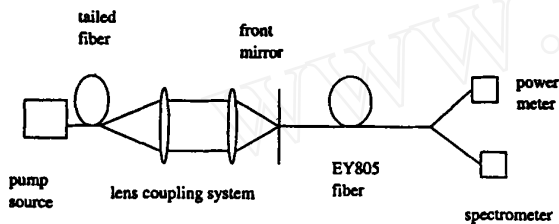


Fig. 8 Experimental setup

3 结论

通过对 980nm 泵浦光泵浦双包层 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺光纤激光器的数值模拟,可得出以下结论:(1) 光纤长度改变时,正向传播的泵浦光功率沿光纤基

本成同一函数分布,反向传播的泵浦光功率变化情况比较明显。(2) 当光纤长度在小于某一范围内变化时,正向传播的激光功率沿光纤轴向分布变化明显。当光纤长度大于某一范围后,激光增益达到饱和,以后激光的分布情况基本不变。(3) 在后腔镜对激光反射率不变的情况下,随后腔镜对泵浦光反射率的增加,激光输出功率将逐渐增大。(4) 在后腔镜对泵浦光反射率不变的情况下,随后腔镜对激光反射率的增加,当泵浦功率较大时,激光输出功率将单调下降。

参考文献

- [1] Aiso K, Tashiro Y, Suzuki T. Furukawa Review, 2001(20): 41 ~ 45.
- [2] Ding M, Cheo P K. IEEE Photon Technol Lett, 1996(12): 1627 ~ 1629.
- [3] Ding M, Cheo P K. IEEE Photon Technol Lett, 1997(3): 324 ~ 326.
- [4] 占生宝, 赵尚弘, 董淑福 *et al.* 激光与红外, 2002, 32(6): 400 ~ 403.
- [5] Dominic V, MacCormack S, Waarts R *et al.* Electron Lett, 1999, 35(14), 1158 ~ 1160.
- [6] Tanguy E, Larat C, Pocholle J P. Opt Commun, 1988(153): 172 ~ 183.
- [7] Karasek M. IEEE J Q E, 1997, 33(10): 1669 ~ 1705.
- [8] Kelson I, Hardy A A. IEEE J Q E, 1998, 34(9), 1570 ~ 1577.
- [9] Pasquale F D. IEEE J Q E, 1996, 32(2): 326 ~ 332.
- [10] Tellert T, DiPasquale F, Federighi M. IEEE Photon Technol Lett, 1996, 8(11): 1462 ~ 1464.

(上接第 344 页)

导致峰值强度的大小和波动幅度均比无啁啾光脉冲入射时所得的结果要大一些。相反,当入射脉冲具有负啁啾时,初始啁啾和色散啁啾共同作用的结果将使得啁啾的波动幅度减小,从而导致峰值强度的大小和波动幅度均比无啁啾光脉冲入射时所得的结果要小一些。

3 结论

超高斯光脉冲在常规单模光纤中传输时,由于具有较平坦的顶部和陡峭的边沿,其脉冲波形、瞬时

频率啁啾、脉冲峰值强度的演变都与高斯光脉冲在光纤中传输时不同。脉冲波形将经历由平顶、多峰、最后为单峰的变化;脉冲峰值强度的变化趋势为先增加后减小;脉冲的演变与入射超高斯脉冲的分布和初始啁啾有关。

参考文献

- [1] Malomed B A, Berntson A. J O S A, 2001, B18: 1243.
- [2] Mrtensson J, Berntson A, Westland M W *et al.* Opt Lett, 2001, 26: 55.
- [3] Linkt R A. IEEE J Q E, 1985, 21: 593.
- [4] Agrawal G P. Nonlinear fiber optics. 2nd, New York: Academic Press, 1995: 71.