

# 光纤中基于交叉相位调制的 超短光脉冲串的产生\*

曹文华

(五邑大学电子工程系, 广东江门 529020)

刘颂豪 郭旗

(华南师范大学量子电子学研究所, 广州 510631)

**摘 要** 提出一种在单模光纤正常色散区由连续波产生超短光脉冲串的新方法。即让连续波和一个波长位于光纤正常色散区的调制脉冲串在光纤中同时传输, 交叉相位调制效应和群速度色散效应的相互作用能使连续波演化成一串超短光脉冲, 其脉冲宽度比调制脉冲串中的脉宽要小得多。本文还通过计算机模拟, 对这一方法进行了全面的考察和分析。结果表明, 该方法不仅实用, 而且可取得较好的效果。

**关键词** 单模光纤, 交叉相位调制, 超短光脉冲。

## 1 引 言

最早提出在光纤中由连续波产生超短光脉冲串的是 Hasegawa<sup>[1]</sup>, 其基本方法是: 先对连续波进行外部振幅调制, 然后让调制后的连续波(波长必须位于光纤负色散区)在光纤中传输, 诱导调制不稳定性<sup>[2]</sup>可使调制后的连续波演化为皮秒量级的超短光脉冲串。不久, 这一方法便得到了实验证实<sup>[3]</sup>。至今, 已发展了许多在光纤中直接或间接地由连续波产生超短光脉冲串的方法<sup>[4-8]</sup>。Dianov 等人指出<sup>[4]</sup>, 文献[1]提出的方法不能产生基本孤子串, 是由于这种方法产生的脉冲总是伴随着较大的脉座, 因而不能实现在光纤中的稳定传输。为此, 他们指出可采取绝热放大的措施在上述方法的基础上获取无相互作用基本孤子串。Mamyshev 等人进一步指出<sup>[5]</sup>, 利用拉曼自散射(RSS)效应和诱导调制不稳定性相互作用不仅可以有效地抑制由 Hasegawa 方法产生的脉冲串中的脉座, 而且能够将全部连续波的能量转化为基本孤子串的能量。与文献[1]、[4]、[5]中的方法不同, Kobayashi 等人通过理论分析表明<sup>[6]</sup>, 若用电光相位调制器对连续波进行调制, 使之产生一定的频率啁啾, 调制后的连续波在通过光纤时, 群速度色散(GVD)效应可使其演化成皮秒量级的超短光脉冲串。而且, 调制器既可使信号获得正啁啾, 也可使信号获得负啁啾, 因此, 被调制的连续波其波长可位于光纤正、负色散区。前述方法都有一个共同点, 这就是首先必须对连续波进行外部的振幅或相位调

\* 广东省自然(青年)科学基金资助项目 950694。

收稿日期: 1996 年 8 月 5 日

制, 因而, 由此产生的超短光脉冲串其重复率由调制频率决定。1991 年, Mamyshev 等人又提出了另一种方法<sup>[7]</sup>: 在光纤负色散区, 让频率不同的两个连续波同时传输, 可用放大办法产生适合于高比特率光纤通信所需的无相互作用基本孤子串。最近的研究表明<sup>[8]</sup>, 这种放大还可由色散缓变光纤实现。上述方法不仅省去了外调制, 而且由此产生的孤子串可以有很高的重复率。

尽管已经有许多关于在光纤中由连续波产生超短光脉冲串的研究, 但是, 除文献[6]外, 迄今的所有研究几乎都集中在光纤负色散区。近年来, 光纤正常色散区超短光脉冲的产生倍受人们重视, 但基本上是通过脉冲压缩的办法产生超短光脉冲<sup>[9-12]</sup>。显然, 前述用于在光纤负色散区由连续波产生超短光脉冲串的各种方法均不再适用于光纤正常色散区, 本文提出一种在光纤正常色散区直接由连续波产生超短光脉冲串的新方法, 即让连续波和一个波长同时位于光纤正常色散区的调制脉冲串(两者频率不同)在光纤中同时传输, 交叉相位调制效应<sup>[9, 10]</sup>和正群速度色散效应的相互作用能使连续波演化成一串新的超短光脉冲, 新产生的脉冲宽度比调制脉冲串中的脉宽要小得多。本文还通过数值模拟, 对这一方法进行了全面的研究, 结果表明, 该方法不仅实用, 而且可取得较好的效果。

## 2 理论模型

考虑两个偏振方向相同、但波长不同的光波在光纤正常色散区中的共同传输, 在慢变包络近似下, 它们的振幅由下述耦合非线性方程组描述,

$$\frac{\partial A_p}{\partial z} + \frac{1}{v_{gp}} \frac{\partial A_p}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_{2p} \frac{\partial^2 A_p}{\partial t^2} = i\gamma_p (|A_p|^2 + 2|A_s|^2) A_p, \quad (1)$$

$$\frac{\partial A_s}{\partial z} + \frac{1}{v_{gs}} \frac{\partial A_s}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_{2s} \frac{\partial^2 A_s}{\partial t^2} = i\gamma_s (|A_s|^2 + 2|A_p|^2) A_s, \quad (2)$$

其中  $A_j(z, t)$  为光波的复振幅( $j = p, s$  分别代表本文中的调制波与信号波),  $v_{gj}$  为光波的群速度,  $\beta_{2j}$  为群速度色散系数,  $\gamma_j$  为非线性系数。它与非线性折射率系数  $n_2$  的关系为  $\gamma_j = 2\pi n_2 / (\lambda_j A_{\text{eff}})$ , 其中  $A_{\text{eff}}$  为光纤有效芯径面积,  $\lambda_j$  为光波波长。若作以下变换

$$\tau = (t - z/v_{gp})/T_0, \quad \zeta = z\beta_{2p}/T_0^2, \quad \mu_p = (\gamma_p T_0^2/\beta_{2p})^{1/2} A_p, \quad \mu_s = (\gamma_s T_0^2/\beta_{2p})^{1/2} A_s, \quad (3)$$

则方程(1)、(2)可表示成下述无量纲的标准形式<sup>[12]</sup>

$$\frac{\partial \mu_p}{\partial \zeta} + \frac{i}{2} \frac{\partial^2 \mu_p}{\partial \tau^2} = i(|\mu_p|^2 + 2|\mu_s|^2) \mu_p, \quad (4)$$

$$\frac{\partial \mu_s}{\partial \zeta} - \delta \frac{\partial \mu_s}{\partial \tau} + \frac{i}{2} \frac{\beta_{2s}}{\beta_{2p}} \frac{\partial^2 \mu_s}{\partial \tau^2} = i r (|\mu_s|^2 + 2|\mu_p|^2) \mu_s, \quad (5)$$

式中  $T_0$  为调制波  $p$  在  $1/e$  功率处的初始半宽度,  $r = \lambda_p/\lambda_s$  为调制波和信号波的中心波长之比。方程(4)左边的第二项和方程(5)左边的第三项表示各光波在传输过程中的群速度色散效应, 方程(4)、(5)右边的第一项和第二项分别表示各光波在传输过程中的自相位调制效应和由于另一光波的存在而引起的交叉相位调制效应。方程(5)左边第二项表示由于两光波群速度不同所引起的传输过程中的相互离散。由(3)式知, 这里选取的参照系以光波的群速度  $v_{gp}$  沿传输方向运动, 因而方程(5)中的离散项表示信号波  $s$  相对于调制波  $p$  的离散, 其中归一化离散参数  $\delta$  的表示式为

$$\delta = T_0(v_{gp}^{-1} - v_{gs}^{-1})/\beta_{2p}, \quad (6)$$

方程组(4)、(5)就是描述两个光波在光纤中共同传输的理论模型。对于给定的初始条件

$u_p(0, \tau)$  和  $u_s(0, \tau)$ , 可用分步傅里叶变换方法对方程组(4)、(5) 进行数值求解。

设  $u_p(0, \tau)$ 、 $u_s(0, \tau)$  分别表示调制脉冲串和连续波(或称为信号波)的初始值, 它们分别具有以下形式

$$u_p(0, \tau) = A_1 \sum_n \exp \left[ -\frac{1}{2} (\tau - nq_0)^2 \right], \quad n = \pm 1, \pm 3, \pm 5, \dots \quad (7)$$

$$u_s(0, t) = A_2, \quad (8)$$

其中  $A_1$ 、 $A_2$  分别表示调制脉冲串的峰值振幅和连续波振幅。组成调制脉冲串的各脉冲具有高斯形状, 且具有相同的峰值振幅、相同的宽度和相同的相位<sup>[2]</sup>, 参数  $q_0$  代表调制脉冲串中相邻脉冲的初始间距。计算机模拟中可通过改变上述参数值来计算不同初始条件下的连续波演化过程。

### 3 数值计算结果及分析

#### 3.1 超短光脉冲串的产生

在求解超短光脉冲串的产生之前, 有必要考察一下比较简单的情况。图 1 示出一个连续波和一个脉冲对在光纤中共同传输时各自的演化结果, 其中虚线代表连续波的初始值。图 1(a) 中连续波的初始值由(8)式给出, 其初始振幅  $A_2 = 0.1$ 。图 1(b) 中脉冲对的初始值由(7)式给出, 对应的参数为  $A_1 = 10$ ,  $q_0 = 3$ ,  $n = \pm 1$ 。这里假设连续波和脉冲对的波长差异较小, 因而在较短的传输距离内可忽略两者之间的相互离散。图 1 表明, 在传输过程中, 脉冲对由于自相位调制效应和正群速度色散效应而迅速展宽, 从而引起了脉冲对中间部分的光强的变化, 光强的变化引起了非线性折射率的变化( $\Delta n \propto n_2 |u_p|^2$ )。因此, 对于处于脉冲对中间部分的连续波来说, 各部分的相位将受到不同程度的调制, 这种相位调制起源于与光强有关的折射率的变化。与自相位调制不同, 前者是由于另一光波的存在而引起的, 因而称为交叉相位调制, 而对于自相位调制来说, 折射率的变化是由于光波自身光强所引起的。由(5)式知, 即使是在两个波强度相等的情况下, 交叉相位调制效应也是自相位调制效应的两倍。而且, 在图 1 中, 脉冲对的光强远大于连续波的光强, 因此, 对于连续波来说, 自相位调制效应相对于交叉相位调制效应很小, 其演化主要是由于交叉相位调制效应与正群速度色散效应的相互作用。交叉相位调制效应将导致连续波产生一定的频率啁啾  $\delta\omega = -\partial\phi/\partial\tau$ , 其中  $\phi$  为相位。显然, 对于处于脉冲对中间部分的连续波来说, 由于脉冲对光强的分布, 上述频率啁啾为负啁啾<sup>[9, 10]</sup>, 即从前沿到后沿的频率逐渐减小。由于在光纤正常色散区, 群速度随频率的增大而

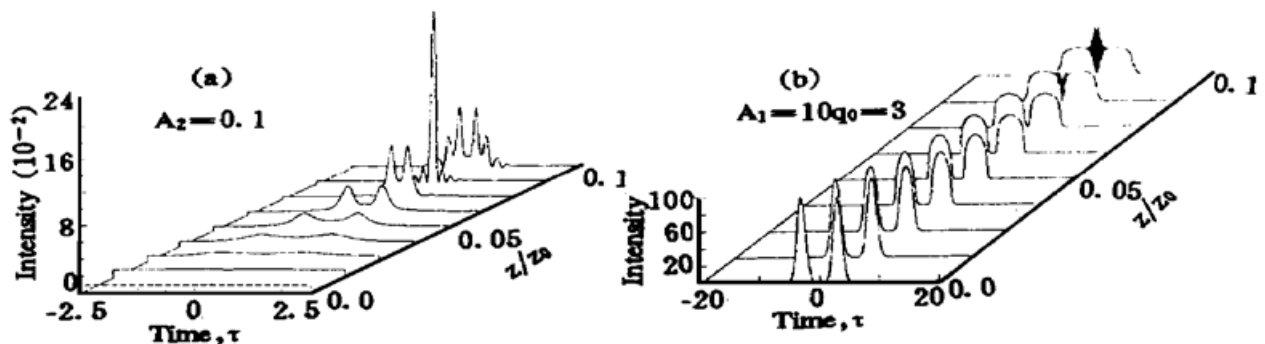


Fig. 1 Evolution of (a) a cw signal and (b) a pulse pair when they propagating together in the normal dispersion regime of an optical fiber. The parameters of the incident cw signal is  $A_2 = 0.1$ . The parameters of the incident pulse pair are  $A_1 = 10$ , and  $q_0 = 3$

减小,这就使得上述连续波的前沿传输得愈来愈慢,后沿愈来愈快,从而造成了能量的堆积和波包脉冲的形成。图 1(a) 中由连续波形成的脉冲峰值功率为初始功率的 22.5 倍,脉宽  $T_{FWHM}$  (半功率点间的全宽度) 大约为初始脉冲对中脉冲宽度的 1/16。

现在假设调制波为脉冲串,进一步求解连续波的演化情况。图 2(a)、图 2(b) 分别示出连续波和调制脉冲串在光纤中共同传输时各自的演化过程。这里连续波的初始值与图 1(a) 中相同,初始调制脉冲串中脉冲峰值功率、脉宽以及脉冲间距  $q_0$  也与图 1(b) 中相同。图 2 表明,随着调制脉冲的逐渐展宽,处于两调制脉冲之间的连续波由于交叉相位调制效应与正群速度色散效应的相互作用而逐渐演化为比调制脉冲更窄的脉冲,结果形成一个重复率与调制脉冲相等、但宽度更窄的超短光脉冲串。计算表明,图 2(a) 中演化到最窄时的信号脉冲宽度及峰值功率与图 1(a) 中基本相同,即大约为初始调制脉冲串中脉冲宽度的 1/16。这里的传输距离以  $z_0 = \pi T_0^2 / (2\beta_{2p})$  为单位,例如,对于初始半宽度  $T_0 = 10$  ps ( $T_{FWHM} \approx 50$  ps)、波长为  $0.9$   $\mu\text{m}$  的调制脉冲串,若  $\beta_{2p}$  取典型值  $25$  ps<sup>2</sup>/km,则  $z_0 \approx 6.28$  km。显然,若增大调制脉冲串的初始峰值功率,则对于脉冲串本身来说,由于自相位调制效应增强,其展宽速度会更快,因而连续波演化为超短光脉冲串所需的最佳光纤长度便会缩短。

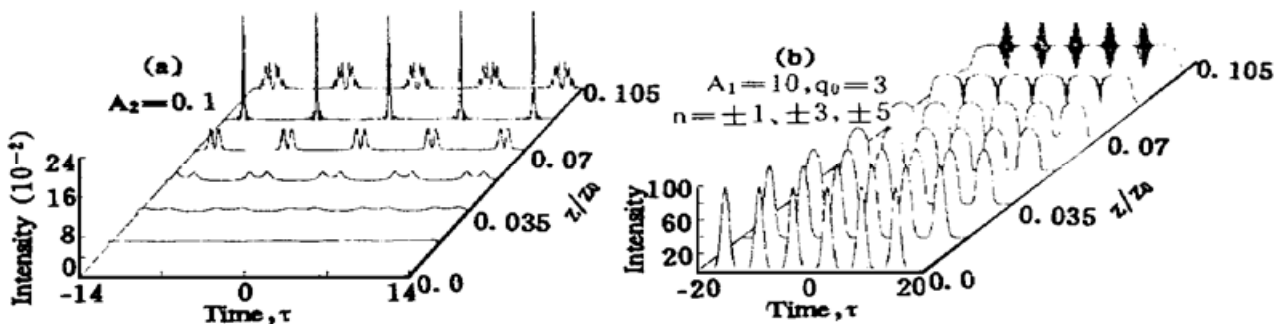


Fig. 2 Evolution of (a) a cw signal and (b) a pulse train when they propagating together in the normal dispersion regime of an optical fiber

### 3.2 超短光脉冲串的产生与初始调制脉冲串的关系

首先,计算超短光脉冲串的产生与调制脉冲串初始强度的关系。图 3(a)~图 3(c) 是对某一固定的连续波输入(初始值与图 2(a) 中相同),通过改变图 2(b) 中调制脉冲串的初始峰值功率(初始宽度以及初始间距  $q_0$  均与图 2(b) 中相同),分别计算出的连续波演化到最窄时的情况,图中仅分别示出其中的一个脉冲。图 3 表明,随着调制脉冲串初始峰值功率的增大,由连续波演化成的超短光脉冲串其脉冲宽度随之减小,且峰值功率随之增大,这是由于交叉相位调制效应不断增强的结果。虽然脉座也有所增大,但脉座增大的趋势较小,而且不会影响超短光脉冲的形成,表现为逐渐形成振荡特性,并向主脉冲的两翼扩散开。

其次有必要研究超短光脉冲串的产生与调制脉冲串初始脉冲间距的关系。图 4(a)~图 4(c) 仍然是假设初始连续波不变的情况下(与图 2(a) 中相同),通过改变调制脉冲串中的初始脉冲间距  $q_0$ ,分别计算出的连续波演化到最窄时的情况。三种情况下,初始调制脉冲串中的脉冲宽度和强度均与图 2(b) 中相同,只是初始间距有所改变。图 4 表明,对于初始脉冲宽度和强度一定的调制脉冲串,其脉冲间距  $q_0$  存在一个最佳值,当  $q_0$  调整到最佳时,由连续波演化成的超短光脉冲的宽度最窄,峰值功率最高,而且脉座也较小。若  $q_0$  偏小,则由于处于调制脉冲串中两个脉冲之间的连续波的能量也小,因此演化后的信号脉冲串的脉冲能量也小;反之,若  $q_0$  偏大,调制效果也会变差,表现为信号脉冲串中主脉冲的能量迅速减小,而两翼的振荡大大加强。

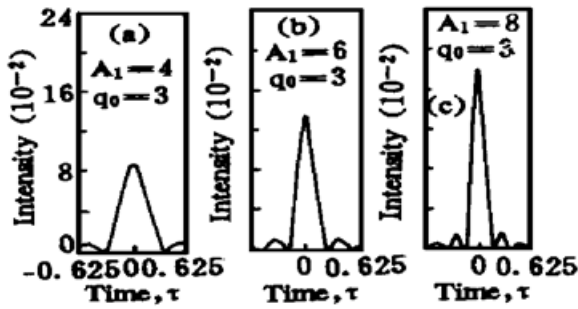


Fig. 3 Generated ultrashort pulses for several peak powers of the initial modulating pulse train at the distances where the width of the generated pulse is minimum. In three cases, the initial cw signals are the same as in Fig. 2 (a), and the initial modulating pulse trains are identical to that of Fig. 2 (b) except that the peak power is varied

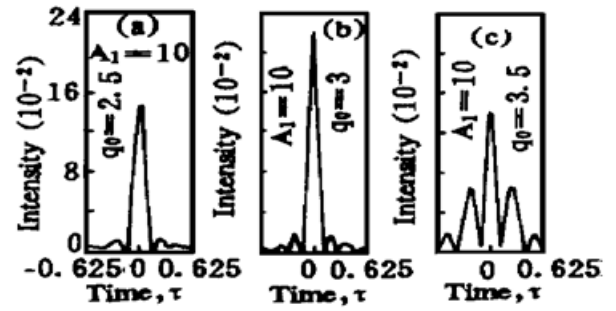


Fig. 4 Generated ultrashort pulseFs for several pulse separation of the initial modulating pulse train at the distances where the width of the generated pulse is minimum. In three cases, the initial cw signals are the same as in Fig. 2 (a), and the initial modulating pulse trains are identical to that of Fig. 2 (b) except that the pulse separation is varied

### 3.3 离散效应对超短光脉冲串产生的影响

以上计算忽略了信号波和调制波在传输过程中群速度的差异,即认为它们是同步传输。在信号波与调制脉冲串波长差异很小、或者调制波强度远大于信号波强度的情况下,上述近似是合理的。因为波长差异愈小,群速度差异也愈小;调制脉冲串强度愈大,信号波演化成超短光脉冲所需的最佳光纤长度愈短。因此,在这两种情况下,离散效应对超短光脉冲串产生的影响也不致于很大。但实际应用中,总希望信号波相对于调制波的波长有个较大的变化范围。而且,这个范围还不能太小,否则在光纤输出端分离信号脉冲时将会遇到困难。在这种情况下,有必要考虑离散效应对超短光脉冲串产生的影响。

仍以图 2 中的初始条件为例。设图 2(b) 中调制脉冲串的脉冲初始半宽度为 10 ps, 波长为  $0.9 \mu\text{m}$ 。常规光纤在波长  $0.9 \mu\text{m}$  处典型参数值  $\beta_{2p} = 25 \text{ ps}^2/\text{km}$ ,  $\gamma_p = 1.3 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$ 。由 (3) 式和 (7)、(8) 式知,  $A_2 = 0.1$  相当于连续波的初始功率为 2 mW,  $A_1 = 10$  相当于调制脉冲串的初始峰值功率为 20 W。若方程 (5) 中离散参数分别取值  $\delta = 30, 20, 12, -12, -20, -30$ , 则由 (6) 式并参考  $v_{gp}^{-1} - v_{gs}^{-1}$  与  $\lambda_p - \lambda_s$  的关系曲线<sup>[2]</sup>, 可计算出连续波的波长大约分别对应于  $1.095 \mu\text{m}$ ,  $1.083 \mu\text{m}$ ,  $1.074 \mu\text{m}$ ,  $1.046 \mu\text{m}$ ,  $1.037 \mu\text{m}$ ,  $1.025 \mu\text{m}$ 。图 5 示出在连续波和调制脉冲串的初始值均与图 2 中相同的情况下(也与图 4(b) 中相同), 对于上述不同的离散参数分别计算出的连续波演化到最窄时的结果(图中仅分别示出其中一个脉冲)。与图 4 (b) 所示的不计离散时的结果相比, 图 5 表明, 离散效应不仅导致信号脉冲宽度增大以及峰值功率的降低, 而且导致信号脉冲相对于调制脉冲具有不同程度的超前或延迟。信号脉冲与调制脉冲的波长差异愈大(即  $|\delta|$  愈大), 离散效应对信号脉冲产生的影响也愈明显。由于这里选取的参照系以调制脉冲串的群速度  $v_{gp}$  沿传输方向运动, 因此图 5 中信号脉冲的超前或延迟是相对于调制脉冲而言的。 $\delta > 0$  表示信号脉冲的群速度比调制脉冲的群速度大, 因此在传输过程中信号脉冲会逐渐超前于调制脉冲; 反之, 若  $\delta < 0$ , 则信号脉冲会落后于调制脉冲。

尽管离散效应对信号脉冲的形成具有一定程度的影响, 但图 5 表明, 在一定的范围内(即信号波与调制波的波长差异处于某个范围内), 信号脉冲的形成仍然有效。可以预料, 若调制脉冲的初始峰值功率增大, 则由于信号脉冲演化到最窄时所需的光纤长度会缩短, 因而离散

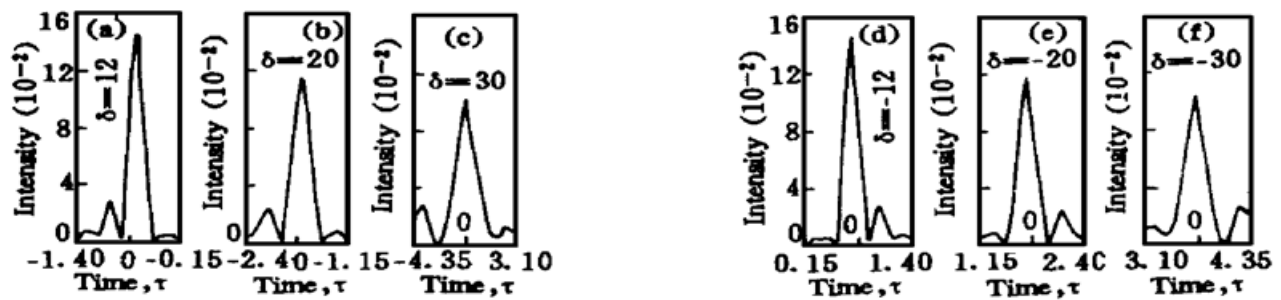


Fig. 5 Generated ultrashort pulses at the distances where the width of the generated pulse is minimum for several walkoff parameters. In all cases, the initial cw signals and the initial modulating pulse trains are identical to those of Fig. 2 except that the walkoff effect is taken into account

效应对信号脉冲产生的影响也会减小。在这种情况下, 信号脉冲与调制脉冲波长的差异可望得到增大。

需要说明的是, 在上面的计算中, 都是假设组成调制脉冲串的各个脉冲具有相同的初相位。那么, 各脉冲初始相位的差异是否会对信号脉冲的形成产生影响呢? 若仍采用图 2 中的初始条件, 并假设调制脉冲串中各脉冲具有不同的初相位(相当于在(7)式中对每个调制脉冲乘以不同的相位因子  $\exp[i(n\theta)]$ )。大量的计算表明, 无论  $\theta$  怎样变化, 信号脉冲的产生均不受影响。这是不难理解的: 因为由(5)式可看出, 信号波在传输过程中所受到的交叉相位调制效应仅与调制波的光强有关, 因而这里  $\theta$  的变化对信号脉冲的形成不起作用。

**结 论** 本文提出了一种在光纤正常色散区由连续波产生超短光脉冲串的新方法, 即让连续波和一个波长同时位于光纤正常色散区的调制脉冲串在光纤中共同传输, 由于交叉相位调制效应和正群速度色散效应的相互作用, 连续波可演化成比调制脉冲窄得多的超短光脉冲串。计算机模拟表明, 对于给定的连续波, 演化后的超短光脉冲串与调制脉冲的初始强度和初始脉冲间距有关。调制脉冲的初始强度愈高, 演化后的超短光脉冲峰值功率愈高、宽度愈窄, 同时所需的最佳光纤长度愈短。对于某一给定的调制脉冲串, 其初始脉冲间距  $q_0$  存在一最佳值, 当  $q_0$  取最佳值时, 产生超短光脉冲串的效果最好。计算还表明, 考虑到离散效应以后, 在较大的波长差异范围内, 上述方法仍然有效。

### 参 考 文 献

- [1] A. Hasegawa, Generation of a train of soliton pulses by induced modulational instability in optical fibers. *Opt. Lett.*, 1984, **9**(7): 288~ 290
- [2] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*. Academic Press, Inc., Boston, San Diego, California, 1989, Chap. 5, 105~ 111
- [3] K. Tai, A. Tomita, J. L. Jewell *et al.*, Generation of subpicosecond solitonlike optical pulses at 0.3 THz repetition rate by induced modulational instability. *Appl. Phys. Lett.*, 1986, **49**(5): 236~ 238
- [4] E. M. Dianov, P. V. Mamyshev, A. M. Prokhorov *et al.*, Generation of a train of fundamental solitons at a high repetition rate in optical fibers. *Opt. Lett.*, 1989, **14**(18): 1008~ 1010
- [5] P. V. Mamyshev, S. V. Chernikov, E. M. Dianov *et al.*, Generation of a high-repetition-rate train of practically noninteracting solitons by using the induced modulational instability and Raman self scattering effects. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(23): 1365~ 1367
- [6] T. Kobayashi, H. Yao, K. Amano *et al.*, Optical pulse compression using high-frequency electrooptic phase modulation. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1988, **QE-24**(2): 382~ 387

- [7] P. V. Mamyshev, S. V. Chernikov, E. M. Dianov, Generation of fundamental soliton trains for high-bit-rate optical fiber communication lines. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1991, **QE-27**(10) : 2347~2355
- [8] B. A. Malomed, Ideal amplification of an ultrashort soliton in a dispersion-decreasing fiber. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(5) : 341~ 343
- [9] R. Jin, M. Liang, G. Khitrova *et al.*, Compression of bright optical pulses by dark solitons. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(7) : 494~ 496
- [10] 曹文华, 刘颂豪, 廖常俊等, 单模光纤中基于暗孤子交叉相位调制的亮脉冲压缩. *光学学报*, 1995, **15**(3) : 281~ 286
- [11] A. T. Ryan, G. P. Agrawal, Pulse compression and spatial phase modulation in normally dispersive nonlinear Kerr media. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(3) : 306~ 308
- [12] Cao Wenhua, Zhang Youwei, The effect of pulse walkoff on the compression of bright optical pulses by dark solitons. *Opt. Commun.*, 1996, **128**(13) : 23~ 29

## Generation of a Train of Ultrashort Optical Pulses by Cross-Phase Modulation in Optical Fibers

Cao Wenhua

(Department of Electronic Engineering, Wuyi University, Jiangmen, Guangdong 529020)

Liu Songhao Guo Qi

(Institute of Quantum Electronics, South China Normal University, Guangzhou 510631)

(Received 5 August 1996)

**Abstract** A new method for ultrashort optical pulse train generation from a cw signal in the normal dispersion regime of optical fibers is suggested. It consists of copropagating a cw signal with a modulating pulse train at a different frequency in the normal dispersion regime of an optical fiber. The cross-phase modulation, imposed by the modulating pulse train on the cw signal, can induce the generation of ultrashort pulse train from the cw signal. Numerical simulations show that the method works well under realistic practical conditions.

**Key words** single-mode fibers, cross-phase modulation, ultrashort optical pulses.