

孤子波在 CPM 腔内效应的模拟计算*

章若冰 张伟力 王清月

(天津大学精仪系, 天津 300027)

提要: 本文利用计算机模拟方法, 模拟 CPM 染料激光器中高阶孤子的形成过程, 获得了 $\lambda=610\text{ nm}$ 的一、二、三阶稳定的孤子数值解, 高阶孤子脉宽为 70 fs , 孤子周期相当于一个光脉冲在腔内往返 200 次。

关键词: 孤子, 自相位调制, 群速色散

Simulation calculation of CPM intracavity effects of soliton waves

Zhang Ruobing, Zhang Weili, Wang Qingyue

(Department of Precision, Instruments, Tianjin University, Tianjin)

Abstract: Using computer simulation, the higher-order soliton shaping process in CPM dye lasers was simulated. The numerical solutions of $N=1,2,3$ stable solitons at 610 nm were obtained. The pulse width of high-order solitons is 70 fs . The soliton period corresponds to about 200 cavity round trips for a light pulse.

Keywords: soliton, self-phase modulation, group-velocity dispersion

描写 CPM 激光器的动力学过程必须建立一个包括饱和增益、饱和吸收、自相位调制、群速色散四种机制在内的动力学方程^[1], 该方程要求其解析解是极其困难的。因此, 我们利用计算机模拟计算的方法, 模拟了 CPM 激光器光孤子的形成过程, 获得了 610 nm 的一、二、三阶稳定的孤子数值解。高阶孤子脉宽为 70 fs , 孤子周期相当于一个光脉冲在腔内往返约 200 次。

一、理论模型

假设腔内有一光脉冲, 使其逐一通过腔内各元件, 每个元件将作用于这一光脉冲, 从而模拟光脉冲在腔内往返振荡过程。通过记录脉冲在时域和频域的变化, 可以确定所需要的孤子数值解。

假定初始脉冲为双曲正割型 (sech^2), 脉冲振幅包络为

$$U(t) = E_0 \text{sech}(t/T_1) \quad (1)$$

式中, $E_0 = [U_0/T_1]^{1/2}$, 为归一化振幅, $\tau = 1.76T_1$ 为脉冲宽度。

本文所用 CPM 染料激光器为六镜环形腔, 包括两个喷流 (DODOI 和 Rh6G) 和四棱镜系统。下面对腔内各个元件对脉冲的影响逐一定量考虑。

1.1 Rh6G 的增益作用

Rh6G 的增益表示为

$$G = G_0 \exp \left[- \left(\int_{-\infty}^t \langle U^2(t') \rangle dt' \right) / \sigma \cdot s \right] \quad (2)$$

其中 $G_0 = g_0 Q(\omega)$, g_0 为线性增益,

$$Q(\omega) = 2 \left\{ \pi \Delta\omega \left[1 + \frac{4(\omega_0 - \omega)^2}{\Delta\omega^2} \right] \right\}^{-1}$$

为洛仑兹线型, ω 为 CPM 激光中心频率, ω_0 为 Rh6G 增益的中心频率, $\Delta\omega$ 为增益线型带宽, σ 为光斑面积, s 是与分子稳定性参数及饱和能量密度有关的参数。我们取参数值^[1]为 $G_0 = 0.05$; $\omega = 3.1 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$; $\omega_0 = 3.3 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$; $\Delta\omega = 2.4 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}$; $\sigma = 0.5 \times 10^{-6} \text{ cm}^2$; $s = U_s s_0 = 15 \text{ mJ/cm}^2$ 。

1.2 DODOI 的可饱和吸收作用

吸收系数表示为

$$s = -s_0 h(\omega) \exp \left\{ \left[- \left(\int_{-\infty}^t \langle U^2(t') \rangle dt' \right) / (U_s \cdot \sigma) \right] (s_1/s_0) \right\} \quad (3)$$

其中 s_0 为 DODOI 线性吸收系数,

$$h(\omega) = 2 \left\{ \pi \Delta\omega_0 \left[1 + \frac{4(\omega_0 - \omega)^2}{\Delta\omega_0^2} \right] \right\}^{-1}$$

为洛仑兹线型, ω_0 为 DODOI 中心吸收频率, $\Delta\omega_0$ 为吸收线型带宽, s_1 为 DODOI 稳定参数, s_0 为 DODOI 感光异构体的稳定参数, σ 为光斑面积, U_s 为 610 nm 处的饱和能量密度。各量值如下: $s_0 h(\omega) = 0.04$; $\omega_0 = 3.2 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$; $\Delta\omega_0 = 2.2 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}$; $s_1 = 4$; $s_0 = 100$; $\sigma = 0.5 \times 10^{-6} \text{ cm}^2$; $U_s = 0.15 \text{ mJ/cm}^2$ 。

1.3 自相位调制效应

在 CPM 染料激光器中, 引起自相位调制效应的主要有三个因素: DODOI 饱和吸收体引起的自相位调制效应, DODOI 喷流中的溶剂乙二醇和 Rh6G 喷流中的溶剂乙二醇引起的 SPM 效应, 其 Rh6G 的增益饱和引起的自相位调制效应可忽略不计。

(1) DODOI 的 SPM 效应

由于 DODOI 的饱和吸收而引起脉冲位相的变化为

$$\delta\varphi(t) = -G(\omega) \frac{\omega l_1}{c} \alpha_0 \exp \left\{ \left[- \left(\int_{-\infty}^t \langle U^2(t') \rangle dt' \right) / (U_s \cdot \sigma) \right] (s_1/s_0) \right\} \quad (4)$$

其中

$$G(\omega) = \frac{\pi}{2} (\omega_0 - \omega) \frac{ch(\omega)}{\omega_0}, \quad \alpha_0 l_1 = 0.4_0$$

(2) DODOI 和 Rh6G 喷流中乙二醇的 SPM 效应

为简单起见, 取两种喷流上光斑面积相同, 则可将两个 SPM 效应合并为一个表达式:

$$\delta\varphi'(t) = -n_2 \omega l_2 \langle U^2(t) \rangle / C \cdot \sigma \quad (5)$$

其中 $l_2 = l_1 + l_3$ 为两喷流厚度之和, $l_1 = 40 \mu\text{m}$ 为 DODOI 喷流厚度, $l_3 = 160 \mu\text{m}$ 为 Rh6G

喷流厚度, $n_2 = 3.0 \times 10^{-16} \text{ cm}^2/\text{W}$ 为非线性折射率系数。

1.4 色散效应

光脉冲通过色散介质时, 不同频率处相位可写成

$$\delta\varphi(\omega) = -\frac{\omega L}{C} n(\omega) \quad (6)$$

$n(\omega)$ 是随频率变化的折射率, L 是色散介质的长度。将 $\delta\varphi(\omega)$ 在 ω_0 附近展开, 有

$$\delta\varphi(\omega) = \delta\varphi(\omega_0) + \left. \frac{d\delta\varphi(\omega)}{d\omega} (\omega - \omega_0) \right|_{\omega_0} + \frac{1}{2} \left. \frac{d^2\delta\varphi(\omega)}{d\omega^2} (\omega - \omega_0)^2 \right|_{\omega_0} + \dots \quad (7)$$

式中第一项和第二项分别对应相位平移和脉冲轮廓最大值的时间平移, 不影响脉冲形状, 故将它略去, 若忽略高于 $(\omega - \omega_0)^2$ 的项, 则群速色散仅由

$$\phi'' = \left. \frac{d^2\delta\varphi(\omega)}{d\omega^2} \right|_{\omega_0}$$

决定。

CPM 染料激光器中的色散可由两个喷流中的溶剂乙二醇、四棱镜中玻璃介质、介质膜反射镜等元件引起, 另外, 四棱镜系统会产生一个可调的色散。

溶剂乙二醇和玻璃介质的色散可用如下的方法计算, 由(6)式可得

$$\phi'' = -\frac{L\lambda^3}{2\pi C^2} \cdot \frac{d^2n}{d\lambda^2} \quad (8)$$

对溶剂乙二醇, 在 $\lambda = 610 \text{ nm}$ 处, $d^2n/d\lambda^2 = 1.8 \times 10^{11} \text{ m}^{-2}$ 。介质膜反射镜的色散随腔内光脉冲波长与反射镜中心波长的偏离而改变, 加上四棱镜系统的可调色散, 我们将腔内色散当作一个总量来处理。我们取 $\phi'' = 130 \text{ fs}^2$ 。

1.5 线性损耗

腔内光脉冲的传播, 由于衍射, 与空气尘埃、微粒发生作用, 对光形成散射损耗, 此外, 各棱镜的折射面也有一定的损耗, 再加上镜反射损耗, 取总损耗 $\gamma = 0.02$ 。

综上所述, 在时域影响光脉冲的因素有增益、吸收、损耗和自相位调制, 设入射光脉冲为

$$\varepsilon_{in}(t) = E_{in}(t) \exp[i\omega_0 t + i\varphi(t)] \quad (9)$$

经过这些元件影响后, 输出脉冲为

$$\varepsilon_{out}(t) = \varepsilon_{in}(t) \cdot e^{\beta} e^{i\delta\varphi(t)} = E_{in}(t) e^{\beta} \exp[i\omega_0 t + i\varphi(t) + i\delta\varphi(t)] \quad (10)$$

式中 $\beta = g, \varepsilon, \gamma$, 分别对应着增益、吸收和损耗, $\delta\varphi(t)$ 对应着自相位调制影响。在频域中, 色散对脉冲的影响是主要的:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{out}(\omega) &= \varepsilon_{in}(\omega) e^{i\delta\phi(\omega)} \\ &= E_{in}(\omega) \exp \left[i\varphi(\omega) + i \frac{1}{2} \phi'' (\omega - \omega_0)^2 \right] \end{aligned} \quad (11)$$

式中 $\frac{1}{2} \phi'' (\omega - \omega_0)^2$ 是由色散引起的。而

$$\varepsilon_{in}(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \varepsilon_{in}(t) e^{i\omega t} dt = E_{in}(\omega) e^{i\varphi(\omega)} \quad (12)$$

因为要多次进行傅里叶变换及其逆变换运算, 我们利用快速傅里叶变换, 使运算速度大大加快。计算机流程图如图 1 所示。计算程序采取 BASIC 语言, 以利于画图; 可在多种机型上运算, 本文用苹果 II 型机。

二、计算结果与讨论

我们运用大量的计算定量分析了 GVD 效应、SPM 效应对脉冲宽度、峰值功率及孤子成形的影响,最后得出一组稳定的孤子解,如图 2、3、4 所示,它们分别对应一、二、三阶孤子解。其中 (a) 是脉冲在时域上的变化, (b) 是相应的脉冲在频域上的变化。

在 (1) 式中,输入脉冲宽度 $\tau = 1.76T_1$ 为 200 fs。一、二、三阶孤子分别对应 U_0 为 9 nJ、36 nJ 和 81 nJ, 这同由孤子理论得到的公式

$$P_A = A^2 P_1 \quad (13)$$

相一致。式中 P_1 为一阶孤子的峰值功率密度, $A = 1, 2, 3$ 分别对应一、二、三阶孤子。

数值计算表明, 大约在腔内往返 200 次脉冲形状得以恢复, 即孤子周期 z_0 为

$$z_0 = N_0 L \quad (14)$$

N_0 为完成一个孤子周期光脉冲在腔内往返次数, L 为腔长。 z_0 与孤子阶数无关。由孤子理论^[2]可知

$$z_0 = 0.322\pi^2\tau^2c/\lambda^2D \quad (15)$$

这里 D 为群速色散(单位 fs/km·nm), λ 为真空中的波长, τ 为脉冲宽度, D 与 ϕ'' 的关系为

$$\phi'' = (\lambda^2/2\pi c)DL \quad (16)$$

由上式可得

$$N_0 = z_0/L = 0.322\pi\tau^2/2\phi'' \quad (17)$$

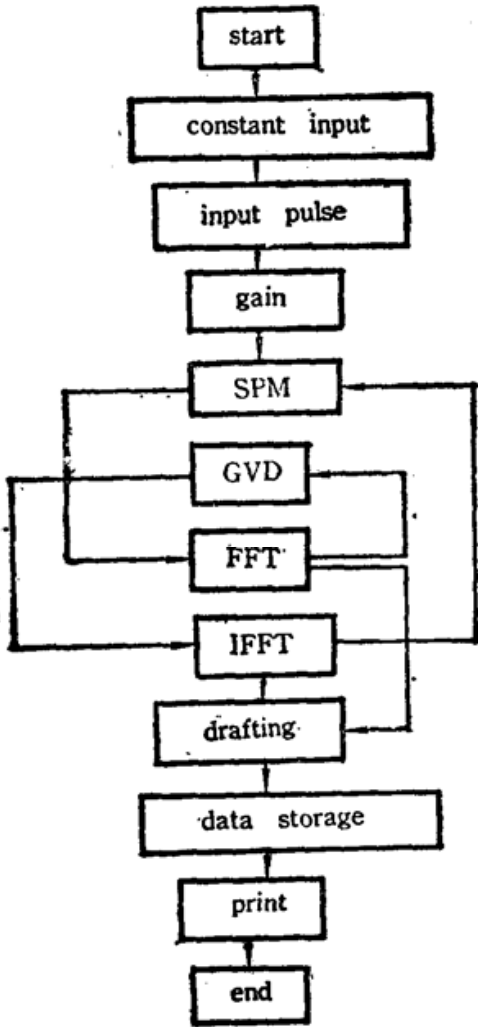


Fig. 1 Computer flow diagram

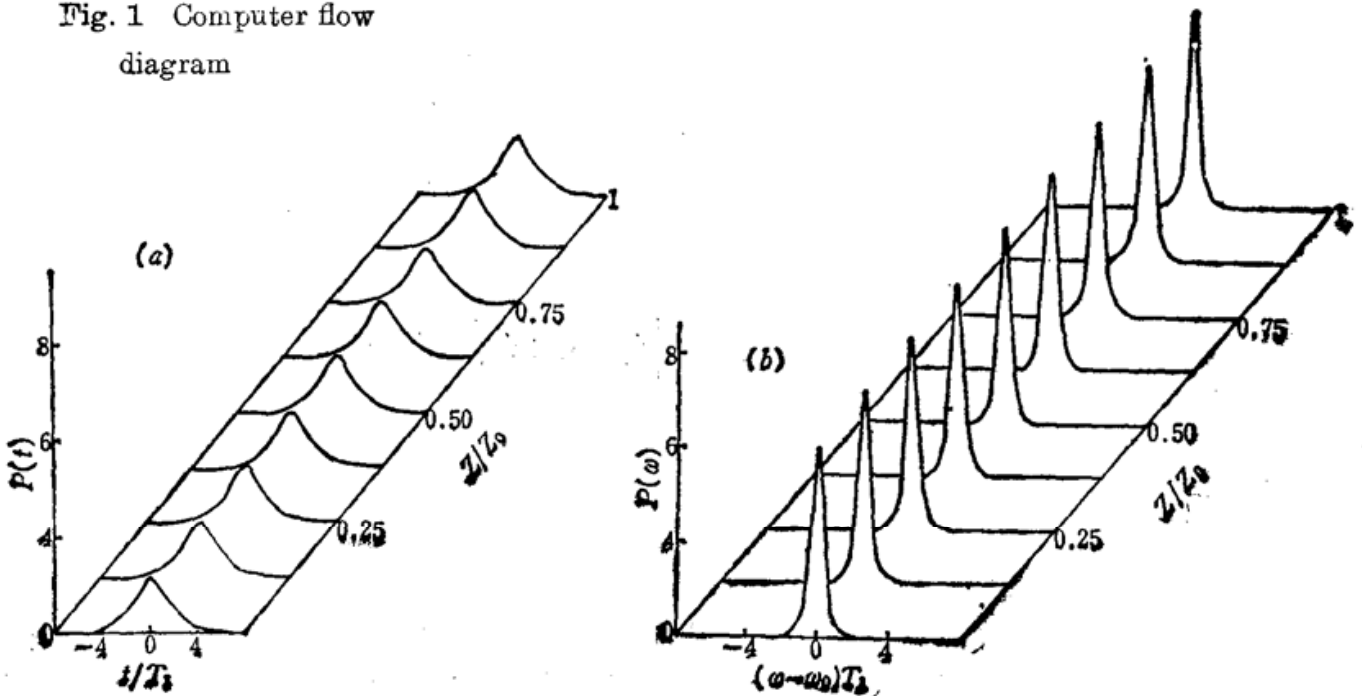
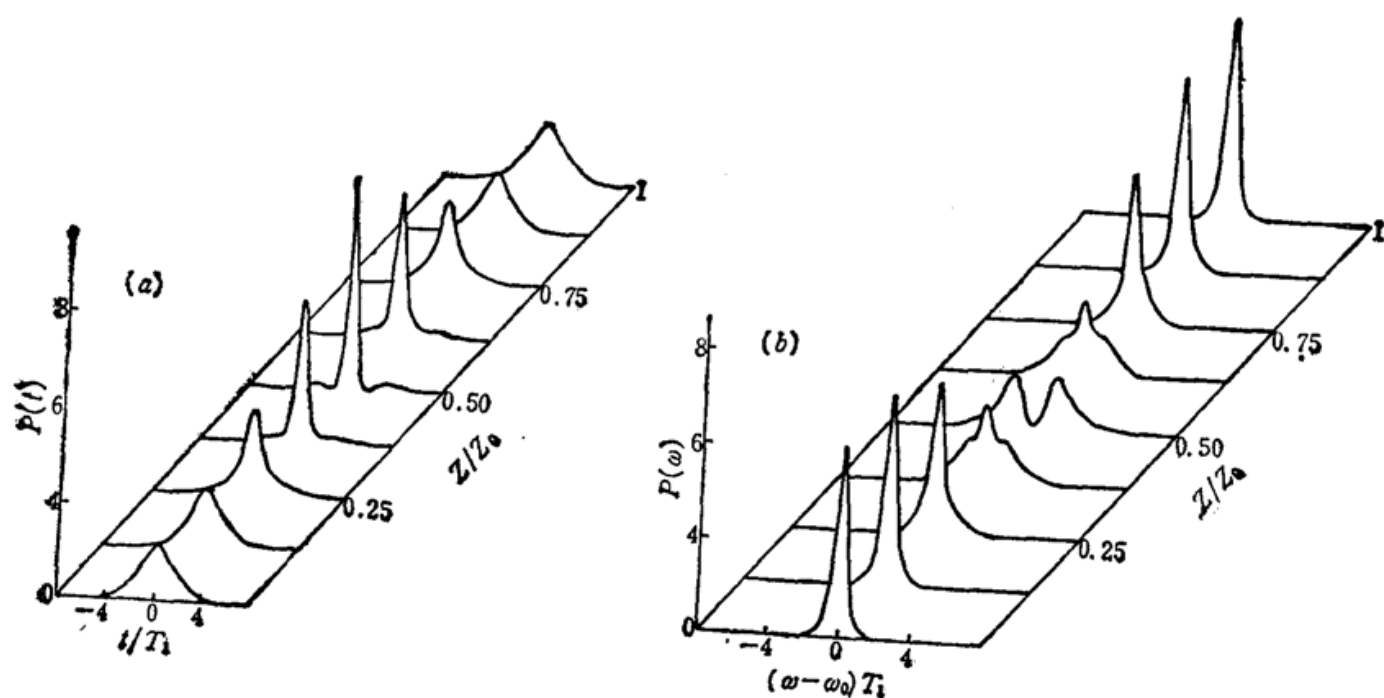
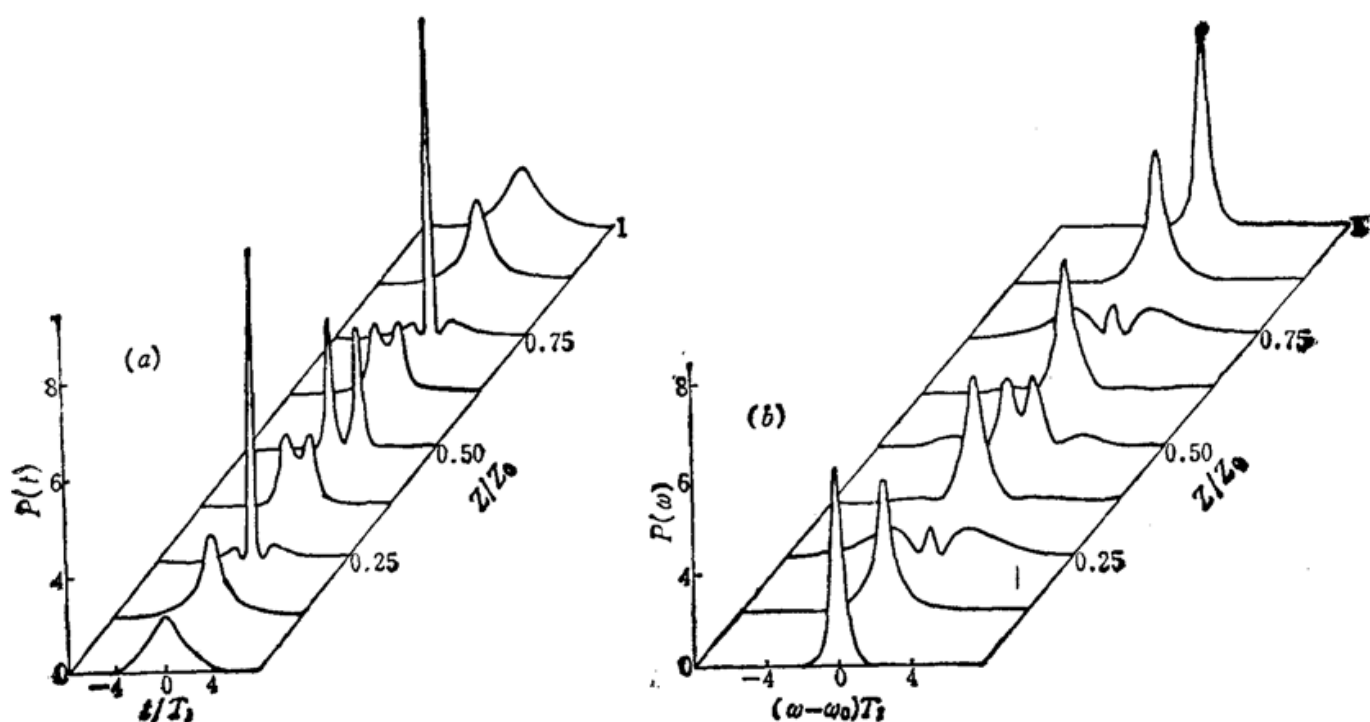


Fig. 2 $n=1$ soliton

Fig. 3 $n=2$ solitonFig. 4 $n=3$ soliton

由上式将 ϕ'' 的值代入可得 N_0 的理论值为 160 次, 与我们数值计算所得值近似吻合。

对 $N=1$ 阶孤子, 其稳定的脉宽约为 200 fs; 对 $N=2$ 阶孤子, 在 $z=z_0/2$ 时出现三凸峰形, 脉宽约为 90 fs; 对 $N=3$ 阶孤子, 在 $z=z_0/4$ 和 $z=3z_0/4$ 时分别出现三凸峰形, 脉宽约为 70 fs。

由图可知, 我们所得到的孤子在频域和时域上其形状都是较为对称的。实际上, 在 CPM 激光器中, 自相位调制是复杂的, 有溶剂乙二醇引起的快克尔效应, 还有 DODOI 可饱和吸收体引起的慢克尔效应。其快克尔效应的影响是对称的, 但其慢克尔效应的影响是不对称的。我们对此做了进一步的理论计算。由(4)式和(5)式, 用计算机绘出了由 DODOI 和溶剂乙二醇

的 SPM 效应分别引起的频移,如图 5 所示。虚线为入射脉冲波形;单点划线为 DODCI 的 SPM 效应引起的频移;双点划线为溶剂乙二醇 SPM 效应引起的频移;实线为二频移的叠加。这组曲线对应于 $N=1$ 阶孤子, $U_0=9\text{ nJ}$ 。很明显,这种情况,在脉冲持续的这段时间内,溶剂乙二醇引起的快克尔效应占了绝对优势。对于 $N=2, 3$ 阶孤子,其脉冲能量更大,情况更是如此。

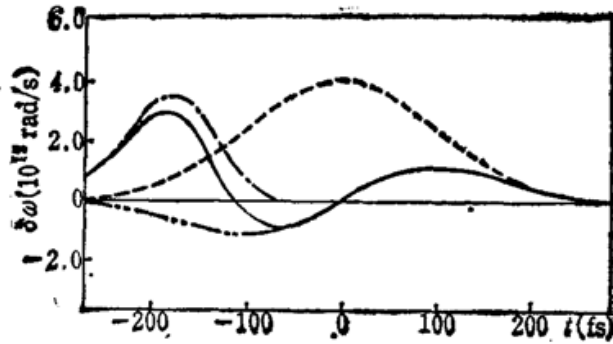
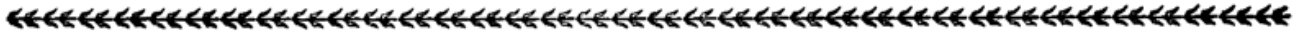


Fig.5 Frequency shift caused by SPM effect
 $\tau=200\text{ fs}, U_0=9\text{ nJ}$

参 考 文 献

- 1 O. E. Martinez *et al.*, *J. Opt. Soc. Am. B*, 2, 754(1985)
- 2 R. H. Stolen *et al.*, *Opt. Lett.*, 8, 186(1983)



第三届全国特种光纤学术讨论会在青岛召开

由中国光学学会纤维光学与集成光学专业委员会主办,青岛电子研究所经办,于1991年9月2日~4日在青岛市召开了第三届全国特种光纤学术讨论会。大会共收到84篇来自高等院校和研究所的学术论文,选出74篇出版了论文集。设置光纤理论与光纤技术两个分会场交流了90篇论文报告。

会议期间举行了纤维光学与集成光学专业委员会会议。会议决定1992年10月底或11月初将在厦门召开下届纤维光学与集成光学联席学术讨论会。

(赵梅村)