

文章编号 : 0253-2239(2002)07-0890-03

# 二次谐波产生中入射啁啾脉冲对相位的影响\*

陈 敏 陈建文 高鸿奕 谢红兰 徐至展

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要: 讨论了基波为频率啁啾脉冲的二次谐波产生过程, 结果表明选取合适的啁啾参量可以提高二次谐波的光强, 但同时会使其波形和相位发生变化。三波相位的畸变主要取决于入射的基波啁啾脉冲, 而与相位匹配的失谐量关系不大。

关键词: 二次谐波; 啁啾脉冲; 相位畸变

中图分类号: O437+.1 文献标识码: A

## 1 引 言

新型非线性光学晶体的光学参变技术是近 10 年来最令人兴奋的研究内容之一。利用 BBO、LBO 及 KTP 晶体等, 目前的参变激光的调谐波长覆盖了从紫外到中红外的波段范围<sup>[1]</sup>。由于晶体的二阶非线性极化率而导致的一些非线性效应是人们感兴趣的。另外由于相位非匹配也会导致光波的相位畸变, 引起增益的下降。有关这方面的理论研究已有很多<sup>[2,3]</sup>。然而如果基波脉冲在入射到非线性晶体之前是频率啁啾的, 就会对光学参变混频有重要的影响, 即它不但会影响二次谐波的增益, 还会使其相位和波面产生变化。本文讨论基波脉冲为频率啁啾时的二次谐波放大过程, 我们发现在三波相位匹配的情况下, 啁啾脉冲对二次谐波的光强有很重要的影响, 同时也会影响三波的相位。

## 2 理 论

在三波耦合光学参变放大过程中, 如果每个相互作用的波的谱宽远远小于其中心频率的话, 就可以认为入射的光波为单色平面波。假定三波沿  $z$  轴传播, 三波的电场分量可以写为:

$$\epsilon_i(z, t) = E_i(z, t) \exp[i(k_i z - \omega_i t)]$$

其中  $i = 1, 2$  表示基波脉冲,  $i = 3$  表示二次谐波,  $\omega_i$  是三波的中心频率,  $\omega_1 = \omega_2 = \omega_3/2$ 。在这种情况下, 三波耦合方程可以得到简化。从麦克斯韦方程式

出发, 采用旋转波近似和慢变振幅近似, 并考虑离散效应时的非相位匹配条件下的耦合波方程为<sup>[4]</sup>:

$$\left. \begin{aligned} \left(\frac{\partial}{\partial z} + \frac{1}{v_1} \frac{\partial}{\partial t}\right) E_1 &= \frac{j\omega_1 d_{\text{eff}}}{2n_1 c} E_2^* E_3 \exp(j\Delta k z), \\ \left(\frac{\partial}{\partial z} + \frac{1}{v_2} \frac{\partial}{\partial t}\right) E_2 &= \frac{j\omega_2 d_{\text{eff}}}{2n_2 c} E_1^* E_3 \exp(j\Delta k z), \\ \left(\frac{\partial}{\partial z} + \frac{1}{v_3} \frac{\partial}{\partial t}\right) E_3 &= \frac{j\omega_3 d_{\text{eff}}}{2n_3 c} E_1 E_2 \exp(-j\Delta k z), \end{aligned} \right\} (1)$$

其中  $v_i (i = 1, 2, 3)$  是三波在非线性晶体中的群速度,  $\Delta k = k_3 - 2k_1$  表示三波的相位非匹配,  $c$  为光波在真空中的速度,  $n_i$  为三波在晶体中的折射率,  $d_{\text{eff}}$  为晶体的有效二阶非线性系数。假定入射的基波都具有高斯形状, 基波  $E_1$  是频率啁啾脉冲, 定义啁啾系数为  $\mathcal{A}(t) = \partial\omega/\partial t$ ,  $\mathcal{A}(t) > 0$  表示正啁啾, 反之表示负啁啾。基波  $E_2$  无啁啾。其三波表达式分别为:

$$\left. \begin{aligned} E_1(0, t) &= E_{10} \exp(-2t^2/\tau_1^2) \exp(-jCt^2), \\ E_2(0, t) &= E_{20} \exp(-2t^2/\tau_2^2), \\ E_3(0, t) &= 0, \end{aligned} \right\} (2)$$

其中  $\tau_i (i = 1, 2)$  是基波脉冲的脉宽。计算的具体参量为: 非线性晶体为 LBO 晶体(二类相位匹配  $o+e \rightarrow o$ ), 入射的基波波长为 1064 nm, 二次谐波波长为 532 nm, 晶体的有效非线性系数为 0.629 pm/V。入射脉冲的束腰直径均为 5 mm, 脉冲宽度为 0.775 ps (FWHM), 入射脉冲的能量为 0.305  $\mu$ J。晶体的长度为 10 mm。当考虑的脉冲宽度超过 100 fs 时, 忽略脉冲的衍射效应是合理的, 因此在(1)式中我们忽略了衍射项。我们使用分裂步长法<sup>[5]</sup>来求解上述方程组。

\* 中国科学院知识创新重大项目资助课题。

E-mail: min\_chen@online.sh.cn

收稿日期: 2001-06-12; 收到修改稿日期: 2001-08-24

### 3 结果和讨论

我们先考虑相位非匹配对二次谐波强度的影响。图 1 给出了在基波无啁啾时二次谐波的强度与相位匹配量之间的关系。 $\Delta k = 0$  意味着绝对的相位匹配,从图中可以看出,在这种情况下,二次谐波的强度最大,然而在实际的二次谐波产生中,相位不匹配是绝对的,因为实际的脉冲具有一定的频宽。在这种情况下,二次谐波的增益达不到理想的情况。

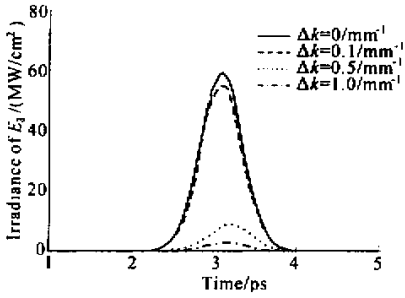


Fig. 1 The irradiance of the second harmonic wave at different phase mis-matching. The fundamental wave  $E_1$  is a non-chirped pulse. The energy of the fundamental wave is  $0.305 \mu\text{J}$

现在考虑在  $\Delta k = 0$  的情况下,入射基波为频率啁啾脉冲对二次谐波的影响。图 2 表示了基波脉冲的啁啾参数分别为 0、-1 和 -10 (THz/ps) 情况下的谐波强度。从图 2 中可以看出,在理想的相位匹配情况下,基波的啁啾参量越大,使产生二次谐波的光强越小,并且脉冲形状变差,在脉冲的前沿出现一个小峰。这主要是由于三波在晶体中的群速不匹配引起的,并且出现的小峰的位置与三波的群速度之间大小有关。在本文计算中,三波的群速度大小分别为  $v_1 < v_3 < v_2$ ,如果令基波脉冲  $E_1$  无啁啾而基波脉冲  $E_2$  为啁啾脉冲,则小峰出现在脉冲的后沿。

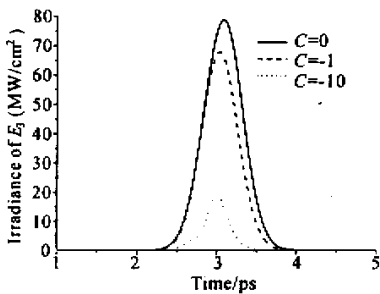


Fig. 2 The irradiance of the second harmonic wave at different chirped pulse with exact phase-match. Another parameters are the same as in Fig. 1

在相位不匹配的情况下,入射啁啾脉冲可以提高二次谐波的效率。从图 3 可以看出,在相位失谐

量  $\Delta k = 1 \text{ mm}^{-1}$  时,当入射基波的啁啾参量为  $-10 \text{ THz/ps}$  时的二次谐波的强度要比没有啁啾时增大数倍。值得注意的是,上述效应的大小与入射啁啾脉冲的正负有关。若入射基波为正啁啾脉冲,上述效应就会小得多。这是因为相位不匹配会导致频率啁啾<sup>[2]</sup>,选取合适的入射脉冲的啁啾参数可以在一定程度上抵消这种频率啁啾,相当于减小了相位失谐量,因而二次谐波的强度得以提高。

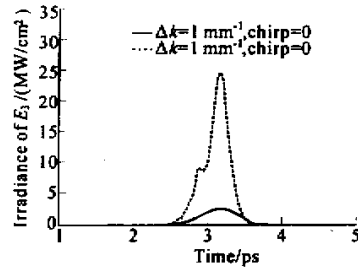


Fig. 3 The irradiance of the second harmonic wave with different  $\Delta k$  and chirp. Another parameters are the same as in Fig. 1

当入射的基波脉冲无啁啾时,三波的相位没有发生畸变。然而,当入射的基波脉冲为啁啾脉冲时,啁啾效应引起基波脉冲的频率调制,入射基波及二次谐波的相位就会发生变化,无论相位是否匹配。

图 4(a)是在绝对相位匹配,入射基波脉冲为无啁啾高斯脉冲的情况下的三波的相位变化。可以看出在这种理想情况下,在三波相互耦合的时间内,三波的相位基本保持不变。当三波的相位失谐量  $\Delta k = 1 \text{ mm}^{-1}$  时,从图 4(b)中可以看出三波的相位有微小的平移,二次谐波  $E_3$  的相位有一个非常微小的倾斜,但基本上没有大的畸变。然而当入射的基波脉冲为啁啾脉冲时,三波的相位发生了很大的变化[图 4(c) 图 4(d)]。在相互耦合过程中,啁啾效应使得  $E_1$  和  $E_3$  的相位发生了很大的畸变,但是对于  $E_2$  的相位的影响却很小,基本保持为一常数。显然,入射的啁啾脉冲对三波的相位的影响要远远大于相位不匹配对三波相位的影响。

上面讨论了在基波脉冲为啁啾脉冲情况下的二次谐波的光强和相位变化。计算结果表明在存在相位不匹配的情况下,适当地选取入射基波脉冲的啁啾参量可以提高二次谐波的增益,然而会使脉冲的波形变差。同时入射的啁啾脉冲会影响三波的相位,使得二次谐波的相位发生畸变。入射的啁啾脉冲效应对三波的相位的影响要远远大于相位不匹配对三波相位的影响。上述效应也可能在频率下转换

的光学参变放大器(振荡器)中发生。这方面的一个例子就是近年来比较热门的光学参变啁啾放大器(OPCPA)的研制<sup>[6]</sup>。

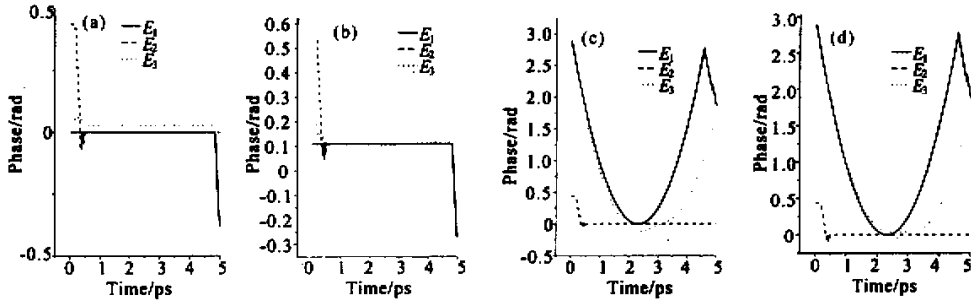


Fig.4 Temporal profiles of the phase shift of all three waves. (a)  $\Delta k = 0, C = 0$ ; (b)  $\Delta k = 1 \text{ mm}^{-1}, C = 0$ ; (c)  $\Delta k = 0, C = -10 \text{ THz/ps}$ ; (d)  $\Delta k = 1 \text{ mm}^{-1}, C = -10 \text{ THz/ps}$

### 参 考 文 献

- [1] Eimerl D, Velsko S, Davis L *et al.*. Progress in nonlinear optical materials for high power lasers. *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*, 1990, **20**(1, 2): 59~113
- [2] Bakker J J, Planken P C M, Kuipers L *et al.*. Phase modulation in second-order nonlinear-optical processes. *Phys. Rev. (A)*, 1990, **42**(7): 4085~4101
- [3] Zhao Yonghua, He Huijun, Wang Zhijiang. Analysis on parametric gain in noncollinear phase-matching configuration. *Acta Optica Sinica*(光学学报), 1998, **18**(12): 1611~1615 (in Chinese)

- [4] Armstrong J A, Bloembergen N, Ducuing J *et al.*. Interaction between light waves in a nonlinear dielectric. *Phys. Rev.*, 1962, **127**(5): 1918~1931
- [5] Smith A, Bowers M S. Phase distortions in sum- and difference-frequency mixing in crystals. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1995, **12**(1): 49~57
- [6] Yang Xiaodong, Xu Zhizhan, Zhang Zengquan *et al.*. Experimental study on Bandwidth of BBO-I noncollinear optical parametric chirped pulse amplification. *Acta Optica Sinica*(光学学报), 2000, **20**(8): 1151~1152 (in Chinese)

## Effect of Chirped Pulse on Phase Distortion in Second Harmonic Generation

Chen Min Chen Jianwen Gao Hongyi Xie Honglan Xu Zhizhan

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

(Received 12 June 2001; revised 24 August 2001)

**Abstract:** The effect of a chirped pulse in the process of second harmonic generation is discussed. The chirp influences the irradiance and the pulse shape of the second harmonic wave with large phase mismatch. The phase distortions of all three waves are dependant strongly on the chirp than on the phase mismatch.

**Key words:** second harmonic generation; chirped pulse; phase distortion