

文章编号: 1001-4322(2004)03-0313-04

高强度三次谐波转换中位相扰动的变化*

李 强¹, 张 彬¹, 栗敬钦², 马 驰², 蔡邦维¹, 魏晓峰²

(1. 四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610064; 2. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 以 V II 类角度失谐三倍频方案为例, 详细讨论了在高强度三次谐波转换过程中入射基频光的位相扰动和振幅调制对三倍频光位相扰动的变化关系, 定量分析了基频光和三倍频光的位相扰动之间的变化关系。模拟结果表明, 三倍频光的位相扰动幅度近似为基频光的三倍; 入射基频光的位相分布对三倍频光的影响比振幅调制的影响更加明显, 但是当入射功率密度较大时, 基频光的振幅调制对三倍频光位相分布的影响明显增大。

关键词: V II 角度失谐; 振幅调制; 位相扰动; 三次谐波转换

中图分类号: O437.1

文献标识码: A

在高强度高效率的谐波转换过程中, 由于增益介质的增益饱和效应、增益非均匀性、光泵浦产生的动态热畸变、光学材料的不均匀性、光学元件表面加工误差引起的面形畸变以及非线性光学效应等因素的影响, 入射基频光总是存在一定的位相扰动和振幅调制。Auerbach 等和钱列加等人分别在小扰动近似下利用微扰理论研究了基频光和三倍频光位相扰动的近似变化关系^[1,2], 何钰娟等人研究了基频光的位相扰动对三倍频光的光强分布的影响^[3], 并对位相扰动条件下三倍频器的参数进行了优化^[4]。在惯性约束核聚变中, 光束的位相分布对光束聚焦性能的影响比振幅调制的影响更为明显, 因此, 本文重点研究三次谐波转换过程中位相扰动的变化, 通过大量的数值模拟计算, 讨论了高强度三次谐波转换过程中基频光的位相扰动和振幅调制对三倍频光位相扰动的变化, 在此基础上, 对基频光和三倍频光的位相扰动之间的定量变化关系进行了研究。

1 理论分析

1.1 谐波转换方程组的数值求解

对于 V II 角度失谐三倍频方案, 耦合波方程组为^[3,5]

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + i2n_e(2) \frac{2}{c} \left[\frac{\partial H}{\partial z} + 2(\) \frac{\partial H}{\partial y} \right] = - \frac{(2)^2}{2c^2} x_1 F^2 \exp(-i k_1 z) - i \frac{2n_e(2)}{c} {}_2 H \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} + i2n_o(\) \frac{1}{c} \frac{\partial F}{\partial z} = - \frac{2}{c^2} x_1 F^* H \exp(i k_1 z) - i \frac{n_o(\)}{c} {}_1 F \quad (2)$$

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} + i2n_e(\) \frac{1}{c} \left[\frac{\partial F}{\partial z} + (\) \frac{\partial F}{\partial y} \right] = - \frac{(\)^2}{c^2} x_2 H^* G \exp(i k_2 z) - i \frac{n_e(\)}{c} {}_1 F \quad (3)$$

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + i2n_o(2) \frac{2}{c} \frac{\partial H}{\partial z} = - \frac{(2)^2}{2c^2} x_2 F^* G \exp(i k_2 z) - i \frac{2n_o(2)}{c} {}_2 H \quad (4)$$

$$\frac{\partial^2 G}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 G}{\partial y^2} + i2n_e(3) \frac{3}{c} \left[\frac{\partial G}{\partial z} + {}_3(\) \frac{\partial G}{\partial y} \right] = - \frac{(3)^2}{c^2} x_2 F H \exp(-i k_2 z) - i \frac{3n_e(3)}{c} {}_3 G \quad (5)$$

式中: F, H, G 分别是基频光、二倍频光和三倍频光的复振幅; $(), {}_2(\)$ 和 ${}_3(\)$ 是离散因子; \hat{z} 是光传播方向 z 与光轴的夹角; x_1 和 x_2 分别是二、三倍频过程的有效非线性系数; k_1 和 k_2 分别为二、三倍频过程位相失配量; $n_e(\), n_e(2)$ 和 $n_e(3)$ 分别是基频、二倍频和三倍频 e 光的折射率, $n_o(\)$ 和 $n_o(2)$ 分别为基频和二倍频 o 光的折射率; $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ 分别是基频光、二倍频光和三倍频光的吸收系数。

上述 (1), (2) 两式为二倍频耦合波方程, (3) ~ (5) 式为三倍频耦合波方程。方程 (1) ~ (5) 的初始条件为

$$F_0 = (2I / \epsilon_0 c)^{1/2}, \quad H_0 = 0, \quad G_0 = 0 \quad (6)$$

式中: ϵ_0 为介电常数; I 为入射基频光功率密度。

* 收稿日期: 2003-08-04; 修订日期: 2003-12-22

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题

作者简介: 李 强 (1978 -), 男, 在读硕士生, 主要从事激光物理与激光技术研究; E-mail: lleeqiang @tom.com.

在数值计算中,把 KDP 晶体分成许多小薄片,每一薄片的厚度作为计算中的步长,以离散傅立叶变换和四阶 R-K 积分方法作为基础,求解谐波转换方程组。

1.2 位相扰动和振幅调制

在计算中,假设入射基频光为具有位相扰动和振幅调制的光束,其场分布可表示为

$$A_1(x, y, 0) = A_{10}(x, y, 0) [1 + a(x, y)] \exp[i p(x, y)] \quad (7)$$

式中: $A_1(x, y, 0)$ 为入射基频光复振幅, $A_{10}(x, y, 0)$ 为无位相扰动和振幅调制的理想光束的光场分布, $p(x, y)$ 为位相扰动, $a(x, y)$ 为振幅调制。

2 数值计算和结果分析

为了定量研究入射基频光的位相扰动和振幅调制的调制深度以及调制周期对三倍频光位相扰动的影响,文中假设入射基频光的位相扰动和振幅调制分别为

$$p(x, y) = p[\sin(2\pi x/l) + \sin(2\pi y/l)] \quad (8)$$

$$a(x, y) = a[\sin(2\pi x/l) + \sin(2\pi y/l)] \quad (9)$$

式中: p, a 是调制深度; l 调制周期。

数值计算利用上述物理模型和计算方法进行,典型例示于图 1~4,本文只给出 $x=0$ 时 y 方向的位相分布。计算中假设入射基频光为有位相扰动和振幅调制的 6 阶超高斯光束,计算所用参数为:二倍频晶体厚度 $L_1=1.18\text{cm}$,三倍频晶体厚度 $L_2=0.80\text{cm}$,失谐角 $\delta_1=300\mu\text{rad}$, $\delta_2=0\mu\text{rad}$,入射基频光的光斑半径 $w=1\text{cm}$ 。非线性系数 $\chi^{(2)}=0.78\text{pm}\cdot\text{V}^{-1}$,二倍频相位匹配角 $\theta_{1m}=49.18^\circ$,三倍频相位匹配角 $\theta_{2m}=59^\circ$ ^[6],基频光、二倍频光和三倍频光的吸收系数分别为 $\alpha_1=0.043\text{cm}^{-1}$, $\alpha_2=0.005\text{cm}^{-1}$, $\alpha_3=0.005\text{cm}^{-1}$ 。

图 1 给出了入射基频光的位相扰动和振幅调制分布,图中入射基频光的位相扰动和振幅调制的调制深度 $p=a=0.2$,调制周期 $l=2\text{mm}$ 。图 2 给出了入射基频光同时具有位相扰动和振幅调制时三倍频光的位相分布,计算参数如下: $I=4.0\text{GW}/\text{cm}^2$, $p=a=0.2$, $l=2.0\text{mm}$ 。图 3 给出了在不同功率密度、调制深度和调制周期的情况下,入射基频光只具有位相扰动时三倍频光的位相分布,计算参数如下:(a) $I=4.0\text{GW}/\text{cm}^2$, $p=0.2$, $l=2.0\text{mm}$;(b) $I=4.0\text{GW}/\text{cm}^2$, $p=0.2$, $l=0.5\text{mm}$;(c) $I=1.0\text{GW}/\text{cm}^2$, $p=0.2$, $l=2.0\text{mm}$ 。图 4 给出了在不同功率密度、调制深度和调制周期的情况下,入射基频光只具有振幅调制时三倍频光的位相分布,计算参数如下:(a) $I=4.0\text{GW}/\text{cm}^2$, $a=0.2$, $l=2.0\text{mm}$;(b) $I=4.0\text{GW}/\text{cm}^2$, $a=0.2$, $l=0.5\text{mm}$;(c) $I=1.0\text{GW}/\text{cm}^2$, $a=0.2$, $l=2.0\text{mm}$ 。

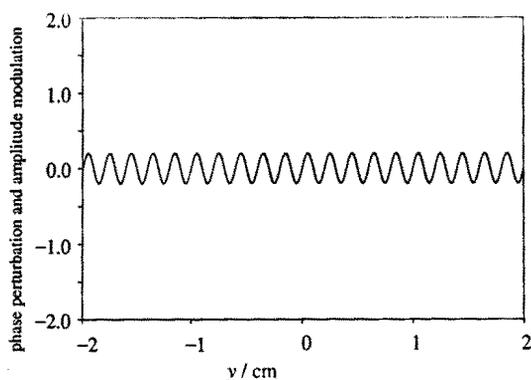


Fig. 1 Phase perturbation and amplitude modulation the incident fundamental field

图 1 基频光的位相扰动和振幅调制分布

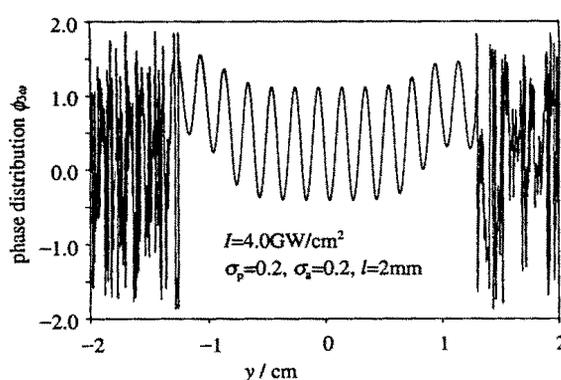


Fig. 2 Phase distribution of the tripling when the fundamental field has both phase perturbation and amplitude modulation

图 2 基频光有位相扰动和振幅调制时三倍频光的位相分布

比较图 1 和图 3(a) 可以看出,入射基频光的位相

扰动经过三次谐波转换后明显被放大了,三倍频光位相扰动的幅度近似为基频光位相扰动的幅度的三倍左右,该结论与利用微扰理论研究得出的结论相一致^[1]。进一步分析可知,基频光和三倍频光位相扰动的调制周期相同,同时,由于衍射效应的影响,光束边缘的位相分布变化非常剧烈。比较图 2、图 3(a) 和图 4(a) 可以看出,入射基频光的振幅调制对三倍频光的位相扰动也存在一定的影响,但是相对于位相扰动的影响来说较小,这是

由于光束位相扰动的增长远快于振幅调制的增长^[2]。比较图 3(a)和图 3(b)可以看出,随着基频光位相扰动的调制周期的减小,位相扰动经过三次谐波转换后的放大倍数将明显减小。由此可见,在三次谐波转换过程中,基频光位相扰动的低频成分对三倍频光的位相扰动影响更大,而高频成分影响相对较小,这也是利用微扰理论研究位相畸变光束三倍频问题时忽略高阶小量的原因^[1]。比较图 4(a)和图 4(b)可以看出,三倍频光位相扰动的幅度基本上不随入射基频光振幅调制周期的变化而变化。比较图 3(a)、图 3(c)和图 4(c)可以看出,当入射光功率密度较小时,三倍频光位相扰动的幅度仍然近似为基频光位相扰动的幅度的三倍左右,但此时基频光的振幅调制对三倍频光位相扰动的影响会明显减小。因此,当入射基频光功率密度较小时,可以主要考虑基频光的位相扰动对三倍频光位相扰动的影响,而当入射光功率密度较大时,则需要同时考虑基频光的位相扰动和振幅调制对三倍频光位相扰动的影响。

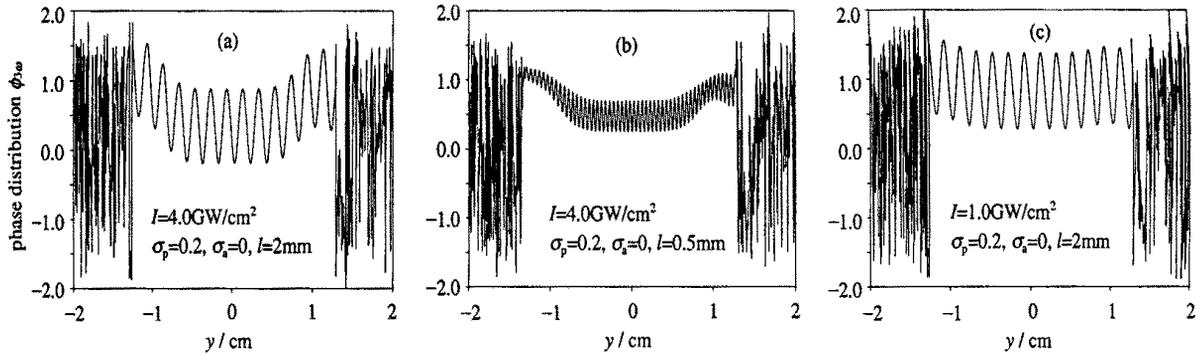


Fig. 3 Phase distribution of the tripling field when the fundamental field has only phase perturbation

图 3 基频光只有位相扰动时三倍频光的位相分布

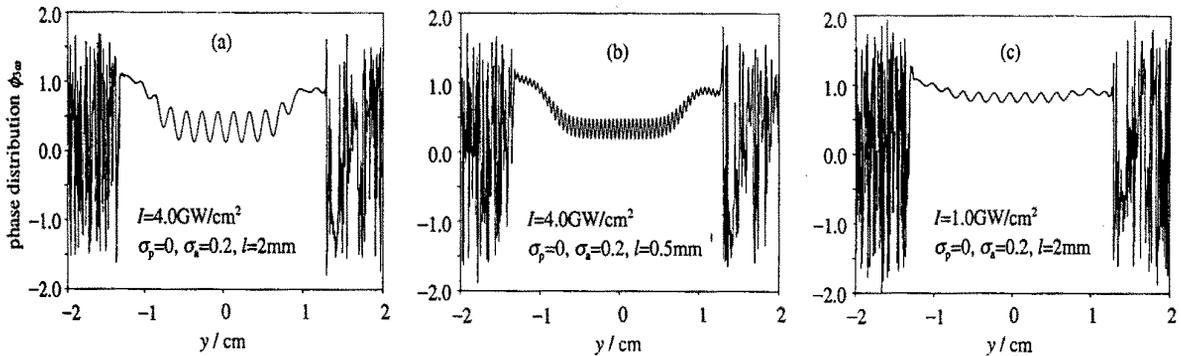


Fig. 4 Phase distribution of the tripling field when the fundamental field has only amplitude modulation

图 4 基频光只有振幅调制时三倍频光的位相分布

3 结 论

本文详细讨论了高强度三次谐波转换过程中基频光的位相扰动和振幅调制对三倍频光位相扰动的影响,在此基础上,研究了基频光和三倍频光的位相扰动之间的定量变化关系。研究表明,在高强度三次谐波转换过程中,入射基频光的位相扰动经过三次谐波转换后将被明显放大,并且三倍频光位相扰动的幅度近似为基频光的三倍。基频光位相扰动的低频成分对三倍频光的位相扰动起主要作用,而高频成分对三倍频光位相扰动的影响相对较小。与位相扰动相比,入射基频光的振幅调制对三倍频光位相扰动的影响相对较小。在基频光功率密度较小时(例如 $I = 1.0 \text{GW}/\text{cm}^2$),基频光的振幅调制对三倍频光的位相扰动影响较小,但是当基频光功率密度较大时(例如 $I = 4.0 \text{GW}/\text{cm}^2$),基频光的振幅调制对三倍频光的位相扰动影响明显增大,此时,必须同时考虑基频光的振幅调制和位相扰动对三倍频光位相扰动的影响。

参考文献：

[1] Auerbach J M, Eimerl D, Milam D, et al. Perturbation theory for electric-field amplitude and phase ripple transfer in frequency doubling and tripling[J]. *Applied Optics*, 1997, 36(3) : 606—612.
 [2] 钱列加,邓锡铭.三倍频激光束特性传输变换的近似模型[J]. *光学学报*,1996,16(9) :1223—1226. (Qian L J, Deng X M. Approximate model on

- transform of beam characteristics frequency tripling. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(9), 1223—1226
- [3] 何钰娟,蔡邦维,魏晓峰,等. 位相扰动对三次谐波转换的影响[J]. 中国激光, 2001, **A28**(9):789—792. (He Y J, Cai B W, Wei X F, et al. Effect of phase ripples on the third harmonic generation. *Chinese Journal of Lasers*, 2001, **A28**(9):789—792)
- [4] 李强,张彬,蔡邦维,等. 振幅调制和位相扰动对三倍频参数优化的影响[J]. 强激光与粒子束, 2003, **15**(1):73—76. (Li Q, Zhang B, Cai B W, et al. Effect of amplitude modulation and phase perturbation on the optimizing parameters of third harmonics generations. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(1):73—76)
- [5] Eimerl D, Auerbach J M, Mildni P W, et al. Paraxial wave theory of second and third harmonic generation in uniaxial crystals. I. narrowband pump fields [J]. *Journal of Modern Optics*, 1995, **42**(5):1037—1067.
- [6] Craxton R S, Jacobs S D, Rizzo J E, et al. Basic properties of KDP related to the frequency conversion of 1 μ m laser radiation[J]. *IEEE J QE*, 1981, **17**(9):1782—1785

Variation of phase perturbation in high power third harmonics conversion

LI Qiang¹, ZHANG Bin¹, SU Jing-qin², MA Chi², CAI Bang-wei¹, WEI Xiao-feng²

(1. College of Electronic Information, Sichuan University, Chengdu 610064, China;

2. Research Center of Laser Fusion, CAEP, P. O. Box 919-988, Mianyang 621900, China)

Abstract: In this paper, taking type I/II angle-detuning scheme as an example, the effect of phase perturbation and amplitude modulation of the high power incident fundamental field on phase perturbation of the tripling field has been discussed in details. The transformation relation between the phase perturbation of fundamental field and tripling field has been analyzed quantitatively. The results of simulation indicate that the amplitude of phase perturbation of the tripling field is about three times as that of the fundamental field. The effect of phase perturbation of the fundamental field on the phase distribution of the tripling field is much more important than that of the amplitude modulation. However, the effect of the amplitude modulation becomes more important as the power density of the fundamental field increases.

Key words: Type I/II angle-detuning; Amplitude modulation; Phase perturbation; Third harmonics conversion